

**ПОСТРОЕНИЕ АКТИВНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ**

**ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
ТЕКУЩЕГО ОТЦЕПНОГО РЕМОНТА ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ  
ПОЛИГОНА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ  
ПРИ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ СЕТИ**

**ПРИМЕНЕНИЕ АГРЕГАТНЫХ ТЯГОВЫХ ПРИВОДОВ  
ДЛЯ ЛОКОМОТИВОВ  
С ПОВЫШЕННЫМИ ТЯГОВЫМИ СВОЙСТВАМИ**

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ  
НА ШИНАХ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

1. Галкин Александр Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, главный редактор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
2. Буйносов Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
3. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, научно-производственный холдинг «СТРАТЕГ», Москва, Россия
4. Симармата Джулиатер, доктор менеджмента, Институт транспорта и логистики Трисакти, Джакарта, Индонезия
5. Цяо Цун, канд. техн. наук, Чжэнчжоуский железнодорожный профессиональный технический институт, Чжэнчжоу, Китай

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

1. Александров Александр Эрнстович, д-р техн. наук, доцент, научный редактор, Екатеринбург
2. Бородин Андрей Федорович, д-р техн. наук, профессор, Москва
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Гриценко Александр Владимирович, д-р техн. наук, доцент, Челябинск
5. Куренков Петр Владимирович, д-р экон. наук, профессор, Москва
6. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
7. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
8. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
9. Локтев Алексей Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Москва
10. Неволин Дмитрий Германович, д-р техн. наук, с. н. с., Екатеринбург
11. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с. н. с., Екатеринбург
12. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
13. Сирина Нина Фридриховна, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
14. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
15. Тушин Николай Андреевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
16. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
17. Якунин Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Оренбург

**INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD**

1. Galkin Alexander Gennadyevich, DSc, professor, editor-in-chief, USURT, Ekaterinburg, Russia
2. Buynosov Alexander Petrovich, DSc, professor, USURT, Ekaterinburg, Russia
3. Kozlov Petr Alexeevich, DSc, professor, Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia
4. Simarmata Juliater, DSc, Trisakti Institute of Transportation and Logistics, Jakarta, Indonesia
5. Qiao Cong, PhD, Zhengzhou Railway Vocational and Technical Institute, Zhengzhou, China

**EDITORIAL BOARD**

1. Alexandrov Alexander Ernstovich, DSc, associate professor, science editor, Ekaterinburg
2. Borodin Andrey Fedorovich, DSc, professor, Moscow
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Gritsenko Alexander Vladimirovich, DSc, associate professor, Chelyabinsk
5. Kurenkov Petr Vladimirovich, DSc, professor, Moscow
6. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
7. Larin Oleg Nikolaevich, DSc, professor, Moscow
8. Ledyev Alexander Petrovich, DSc, professor, St. Petersburg
9. Loktev Alexey Alexeevich, DSc, professor, Moscow
10. Nevolin Dmitriy Germanovich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
11. Rumyantsev Sergey Alexeevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
12. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
13. Sirina Nina Fridrikhovna, DSc, professor, Ekaterinburg
14. Smolyaninov Alexander Vasilyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
15. Tushin Nikolay Andreevich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
16. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
17. Yakunin Nikolay Nikolaevich, DSc, professor, Orenburg

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА**

*П. А. Козлов, В. П. Козлова, Н. А. Тушин, М. А. Туманов.*  
**Построение активной автоматизированной системы управления транспортными потоками** ..... 3

**ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО**

*А. В. Смольянинов, В. Ф. Кармацкий, О. В. Черепов.*  
**Организационно-технологические аспекты текущего отцепочного ремонта грузовых вагонов** ..... 8

*О. В. Черепов, М. А. Звягина, В. Ф. Лапшин.*  
**Повреждаемость инновационных вагонов, используемых для перевозки минеральных удобрений** ..... 16

*С. В. Павлов, А. Г. Семенов.*  
**Проектирование, модернизация и производство стабилизаторов поперечного наклона вагонов для скоростного двухэтажного подвижного состава** ..... 22

**ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ**

*С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский, К. А. Калинин, М. В. Роменская.*  
**Определение пропускной способности полигона железной дороги при различной конфигурации сети** ..... 27

*Е. В. Швецова, В. Н. Шуть.*  
**Алгоритм организации перевозок на основе критического элемента матрицы корреспонденций** ..... 34

**ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА**

*А. С. Космодамианский, А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, Е. В. Николаев.*  
**Применение агрегатных тяговых приводов для локомотивов с повышенными тяговыми свойствами** ..... 41

**ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО**

*Б. Э. Глюзберг.*  
**Анализ динамики и кинематики движения по сочетаниям стрелочных переводов для реализации резервов повышения пропускной способности горловин станций** ..... 49

**АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ**

*Н. С. Захаров, С. А. Теньковская, А. Э. Александров.*  
**Повышение надежности функционирования транспортно-технологических систем путем ограничения срока службы автомобилей** ..... 54

*В. А. Бузин, Н. С. Захаров, А. Э. Александров.*  
**Организация технического обслуживания с учетом вариации интенсивности эксплуатации автомобилей** ..... 60

*Д. Г. Неволин, А. А. Цариков, В. Г. Бондаренко.*  
**Существующие модели организации маршрутов скоростного общественного транспорта и их влияние на время поездки пассажира** ..... 66

*С. А. Аземша.*  
**Обоснование оптимальной вместимости модуля в составе пассажирского транспортного средства для регулярных городских перевозок** ..... 71

*Е. В. Голов, Е. В. Сорокина, С. С. Евтюков.*  
**Специфика колееобразования как фактора риска дорожно-транспортных происшествий в подсистеме «Автомобильная дорога»** ..... 79

**ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

*Р. В. Панкина.*  
**О тенденциях российского контейнерного рынка** ..... 86

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА**

*Е. А. Третьяков, О. В. Балагин, С. В. Живушко, К. А. Калинин, Э. Есиркепов.*  
**Результаты испытаний сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей электровозов на основе электрокинетических явлений в условиях депо** ..... 92

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ**

*А. А. Пышкин, Д. В. Лесников.*  
**Методика определения корреляционной функции напряжения на шинах тяговой подстанции постоянного тока** ..... 97

*В. В. Томилов, О. А. Сидоров, С. М. Утепбергенова.*  
**Влияние увеличенного зигзага контактного провода на распределение мощности нагрева ползца токоприемника магистрального электроподвижного состава** ..... 101

*Е. В. Добрынин, К. В. Богданова, Е. М. Плохов.*  
**Оценка влияния неоднородности тяговой сети на работу системы контроля параметров движения электроподвижных составов** ..... 108

**GENERAL TRANSPORT PROBLEMS**

*P. A. Kozlov, V. P. Kozlova, N. A. Tushin, M. A. Tumanov.*  
**Elaborating an active automated traffic flow management system** ..... 3

**RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT**

*A. V. Smolyaninov, V. F. Karmatskiy, O. V. Cherepov.*  
**Organizational and technological aspects of current uncoupling repair of freight railway cars** ..... 8

*O. V. Cherepov, M. A. Zvyagina, V. F. Lapshin.*  
**Damage rate of innovative railcars used for transportation of mineral fertilizers** ..... 16

*S. V. Pavlov, A. G. Semenov.*  
**Design, modernization and production of lateral tilt stabilizers for high-speed double-deck rolling stock** ..... 22

**CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION**

*S. P. Vakulenko, D. Yu. Romenskiy, K. A. Kalinin, M. V. Romenskaya.*  
**Determining of the throughput capacity of railway testing facilities with different network configurations** ..... 27

*E. V. Shvetsova, V. N. Shut'. The algorithm of transportation organization based on the critical element of a correspondence matrix* ..... 34

**ROLLING STOCK AND TRACTION**

*A. S. Kosmodamianskiy, A. A. Pugachev, V. I. Vorobyev, O. V. Izmerov, E. V. Nikolaev.*  
**Application of aggregate traction drives for locomotives with increased traction properties** ..... 41

**RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK**

*B. E. Glyuzberg.*  
**Analysis of movement dynamics and kinematics by combinations of switches for the fulfillment of reserves for increasing the throughput of station necks** ..... 49

**MOTOR TRANSPORT**

*N. S. Zakharov, S. A. Ten'kovskaya, A. E. Alexandrov.*  
**Improving the operation reliability of transport and technological systems by limiting vehicle service lifetime** ..... 54

*V. A. Buzin, N. S. Zakharov, A. E. Alexandrov.*  
**Organization of technical maintenance taking into account variations of vehicle operation intensity** ..... 60

*D. G. Nevolin, A. A. Tsarikov, V. G. Bondarenko.*  
**Existing models of organizing high-speed public transport routes and their impact on passenger travel time** ..... 66

*S. A. Azemsha.*  
**Substantiation of the optimal capacity of a module as part of a passenger vehicle for scheduled urban transportation** ..... 71

*E. V. Golov, E. V. Sorokina, S. S. Evtukov.*  
**The specifics of wheeltrack formation as a risk factor for road traffic accidents in the «Motor road» subsystem** ..... 79

**TRANSPORT AND LOGISTICS PROCESSES**

*R. V. Pankina.*  
**Regarding the trends of the Russian container shipping market** ..... 86

**ELECTRIC TRACTION**

*E. A. Tret'yakov, O. V. Balagin, S. V. Zhivushko, K. A. Kalin, E. Esirkepov.*  
**Testing results of humidified insulation drying of traction electric engines of electric locomotives based on electrokinetic phenomena in depot conditions** ..... 92

**ELECTRIC SUPPLY**

*A. A. Pyshkin, D. V. Lesnikov.*  
**Methodology for determining the correlation function of voltage on the busbars of a DC traction substation** ..... 97

*V. V. Tomilov, O. A. Sidorov, S. M. Utepbergenova.*  
**The impact of the enhanced zigzag of a contact wire on distribution of the heating power of a pantograph slide of the main electric rolling stock** ..... 101

*E. V. Dobrynin, K. V. Bogdanova, E. M. Plokhov.*  
**Evaluation of the heterogeneity impact of a traction network on operation of control system parameters of movement of electric rolling stocks** ..... 108

УДК 656.078

**Петр Алексеевич Козлов, доктор технических наук, профессор, президент научно-производственного холдинга СТРАТЕГ, Москва, Россия,**  
**Валерия Петровна Козлова, доктор экономических наук, профессор кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,**  
**Николай Андреевич Тушин, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,**  
**Михаил Андреевич Туманов, старший преподаватель кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия**

## ПОСТРОЕНИЕ АКТИВНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ

**Petr Alexeevich Kozlov, DSc in Engineering, Professor, President of Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia,**  
**Valeriya Petrovna Kozlova, DSc in Economics, Professor, Systems of Transport Infrastructure Management Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,**  
**Nikolay Andreevich Tushin, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,**  
**Mikhail Andreevich Tumanov, Senior Lecturer, Transportation Business and Intelligent Systems Management Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia**

### Elaborating an active automated traffic flow management system

#### Аннотация

В статье рассмотрены принципы построения интеллектуальной системы автоматизированного управления транспортными потоками. Показано, что существующие так называемые автоматизированные системы управления (АСУ) пока являются лишь информационными — управляющие решения диспетчеры принимают без помощи средств автоматизации.

Предлагается существенное изменение структуры и содержания применяемых АСУ. Авторы рекомендуют включить в них оптимизационные модели. Как показывает анализ, такие модели уже созданы, однако технология их использования пока не разработана. Необходимо создать и рациональную структуру адаптивных систем управления. В статье даются рекомендации по выбору оптимизационных моделей и сфере их эффективного применения. Каждая модель позволяет рассчитать оптимальную схему потоков в динамике с учетом заданных особенностей. Проверку результатов оптимизационных расчетов предлагается проверять на имитационных моделях. Системы должны быть адаптивными, с самообучением.

Реализация принципов построения интеллектуальной системы автоматизированного управления позволит создать рациональную структуру и технологию работы адаптивных систем автоматизированного управления (САУ).

**Ключевые слова:** оптимизация, имитация, модель, автоматизация, потоки, транспорт.

#### Abstract

The article discusses the principles of elaborating an intelligent automated traffic management system. It is demonstrated that the existing so-called automated control systems are still only informational — control decisions are made by dispatchers without assistance of automation tools.

A significant change in the structure and content of the applied automated control systems is proposed. The authors recommend to include optimization models in them. As the analysis indicates, such models have already been created, but the technology for their use has not yet been developed. It is also necessary to create a rational structure of adaptive control systems. The article provides recommendations on the choice of optimization models and the scope of their effective application. Each model allows us to calculate the optimal flow scheme in dynamics, taking into consideration the specified features. It is proposed to verify the results of optimization calculations on simulation models. Systems should be adaptive, with self-learning.

The implementation of the principles of elaboration of an intelligent automated control system would make it possible to create a rational structure and technology of adaptive automated control systems.

**Keywords:** optimization, simulation, model, automation, flows, transport.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-3-7

## ВВЕДЕНИЕ

**В** рыночной экономике происходит усложнение функций управления транспортом. Если при плановой экономике основной задачей железных дорог были перевозки, то теперь — транспортное обслуживание. Эти два понятия отличаются экономическим содержанием. При взаимодействии транспорта и производства возникают дополнительные транзакционные издержки, так называемые стыковые потери. Предприятия вынуждены создавать резервы складских емкостей, путевого развития, подвижного состава, перерабатывающей способности погрузочно-выгрузочных комплексов. Из-за неритмичного подвода вагонов и грузов простаивает оборудование, нерационально используется рабочее время сотрудников. При первой задаче (перевозках) дополнительные издержки относились на производство. Реализация второй задачи (транспортного обслуживания) связана с передачей управления стыковыми потерями перевозчику. Необходимо не только перевезти груз в соответствии с нормативными сроками, но и минимизировать стыковые потери.

Новая цель управления формулируется как обеспечение надежного и эффективного экономического взаимодействия. Объектом управления становятся транспортные связи между поставщиками и потребителями. Важными характеристиками транспортной сети являются не только структура и объемы перевозок, но и графики поставок, темпы отгрузки. При управлении необходимо учитывать и рыночную динамику. Изменение направлений и объемов перевозок потребует оценки доступных ресурсов и резервов транспортной системы. Актуальными про-

блемами являются согласованный подвод грузов и порожних вагонов к портам, пограничным переходам, крупным потребителям.

Рациональное управление транспортными потоками предполагает:

- оптимальное согласование ритмов работы поставщиков, потребителей и перевозчиков;
- сокращение непроизводительных простоев производственного оборудования и подвижного состава;
- минимизацию затрат на перевозки;
- снижение стыковых потерь грузовладельцев.

Диспетчер не в силах вручную пересчитать огромное число возможных вариантов решения таких задач. Причем для этих целей уже разработаны соответствующие модели, однако современные АСУ их не используют, до сих пор оставаясь лишь информационными системами.

В железнодорожной отрасли развитию информационных технологий и автоматизации диспетчерского руководства всегда уделялось особое внимание. Постоянно модернизируется информационная среда, создана сеть центров управления перевозками на основе интегрированной системы мониторинга перевозочного процесса, введены в эксплуатацию такие системы, как ДИСПАРК (рис. 1), ЭТРАН, СИРИУС.

Можно сказать, что информационные технологии стали бизнес-образующим фактором для железнодорожного транспорта и во многом определяют, насколько эффективно он может работать на рынке перевозок [1]. Однако необходимый уровень оптимизации управления пока практического применения в диспетчерском руководстве не получил.

## ДИСПАРК

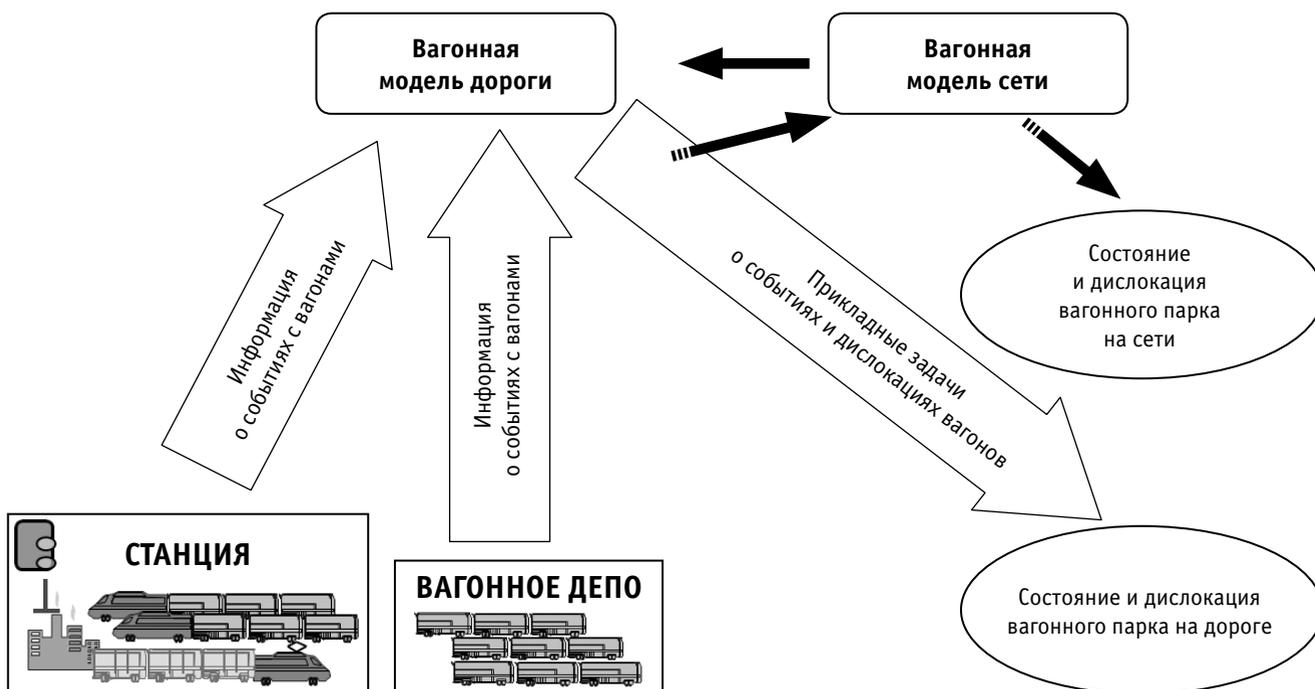


Рис. 1. Функции АСУ ДИСПАРК

Основные АСУ, которые относятся к управлению потоками, позволяют получить лишь информацию о дислокации вагонов, обеспеченности перевозочного процесса локомотивами, проведении ремонтных работ на объектах инфраструктуры, а также о наличии и статусе заявок на перевозки грузов (рис. 2). Но управляющие решения диспетчеры принимают без помощи АСУ.

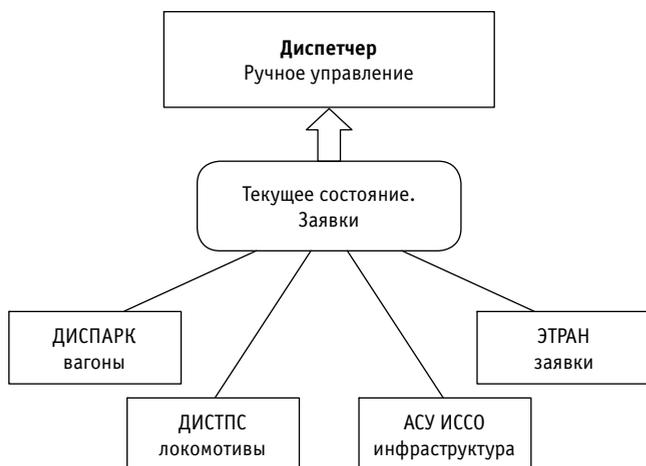


Рис. 2. Поточковые АСУ как информационные системы

Развитие диспетчерских центров управления перевозками (ДЦУП) должно было проходить в три этапа. В первую очередь требовалось автоматизировать сбор информации и отображение поездной ситуации. На этом (информационно-справочном) этапе ставилась задача освободить диспетчеров от сбора и фиксирования информации, повысить достоверность сведений. Первый наиболее капиталоемкий этап фактически реализован — создан фундамент системы оперативного управления перевозками.

Второй (прогнозный) этап предусматривал моделирование эксплуатационной работы на несколько часов вперед. Практика показывает, что прогноз формируется вручную и носит приблизительный характер (этот фактор отмечает, в частности, и Д. Ю. Левин [2]). До создания ДЦУП дорожный диспетчер отставал от реальной поездной работы на два-три часа, и в поездном положении фиксировали прошедшие события. С переводом в ДЦУП диспетчер стал получать информацию в реальном времени, но, как и прежде, недостаточно принимает участие в управлении перевозочным процессом. Причина этого парадокса заключается в том, что управлять можно только предстоящими событиями. Другими словами, у дорожного диспетчера отсутствует предмет управления либо в необходимом объеме информация для планирования и управления поездной работой.

Для автоматизации управления технологическими процессами железных дорог требуется внедрять прогнозные и управляющие модели. Если на прогнозном этапе моделируются предстоящие события, выявляются возможные затруднения, то на следующем этапе развития диспетчерских центров должны применяться методы формирования и поддержки эффек-

тивных управленческих решений. Существующая технология логистического управления грузопотоками на основе систем «Грузовой экспресс» и ЭТРАН является полезным на практике комплексом информационной поддержки. В то же время практически отсутствуют предложения по методам решения оптимизационных управленческих и стратегических задач [3].

Внедрение математических моделей в качестве оптимизационных блоков, помогающих диспетчерам принимать эффективные решения, требует серьезной перестройки самих АСУ [4].

### СТРУКТУРА АКТИВНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ (САУ)

Необходимо разработать принципы построения систем управления с оптимизационными моделями. Системы должны быть адаптивными, с самообучением. Для отличия от применяемых комплексов предлагается ввести термин «активная система автоматизированного управления» (САУ). САУ взаимодействует с существующими информационными системами для автоматизированного получения исходной информации. Кроме того, в динамичной экономике могут часто меняться экономические связи, соответственно при длительных перевозках необходимо учитывать и этот аспект (рис. 3).

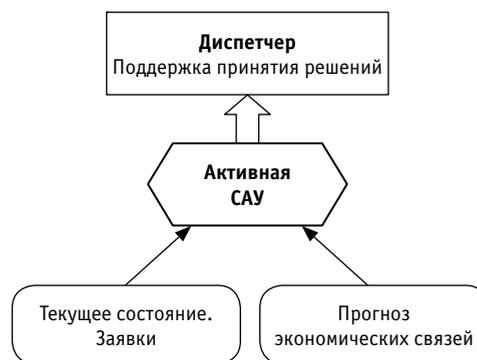


Рис. 3. Внешние связи САУ

Активная автоматизированная система управления транспортными потоками включает в себя составные части, представленные на рис. 4.



Рис. 4. Схема структуры активной САУ

В каждом блоке решаются определенные задачи.

*Блок динамического прогноза*

Для принятия корректных решений по управлению потоками необходимо знать не только состояние расчетной системы на начальный момент, но и динамику состояния на весь планируемый период.

- Сюда будут входить прогнозы:
  - состояния инфраструктуры;
  - динамики потоков;
  - обеспечения потоков локомотивами.

Динамичный прогноз означает знание состояния на любой момент расчетного периода. Сделать это нетрудно. Если известны потоки на начало расчетного периода и заявки на будущее, то следует наложить их на схему полигонов. При этом можно получить информацию о загрузке каждого участка и о возможных резервах пропускных способностей для планируемых потоков.

*Блок расчета параметров оптимизационной модели*

Основные параметры в оптимизационных моделях — время хода по направлениям и свободная пропускная способность по участкам. Блок должен рассчитать их на основе прогнозов.

*Оптимизационные модели*

В качестве оптимизационных рекомендуется использовать следующие модели: динамическую транспортную задачу (ДТЗ) с ущербом, стохастическую ДТЗ, метод динамического согласования, модель полного оборота вагонов [5–11]. Каждая модель позволяет рассчитать оптимальную схему потоков в динамике с учетом заданных особенностей.

*Имитационные модели*

После определения параметров следует расчет потоков с использованием той или иной оптимизационной модели. Однако, как показывает опыт, определение параметров модели по уровню принятой свободной пропускной способности участков и локомотивной обеспеченности не всегда дает верные результаты. А ошибки могут быть слишком дорогостоящими, в частности, например, при задержке морских судов. Поэтому реализуемость полученного плана рекомендуется проверять на имитационной модели. Здесь предлагается использовать имитационную систему ИМЕТРА [5], ко-

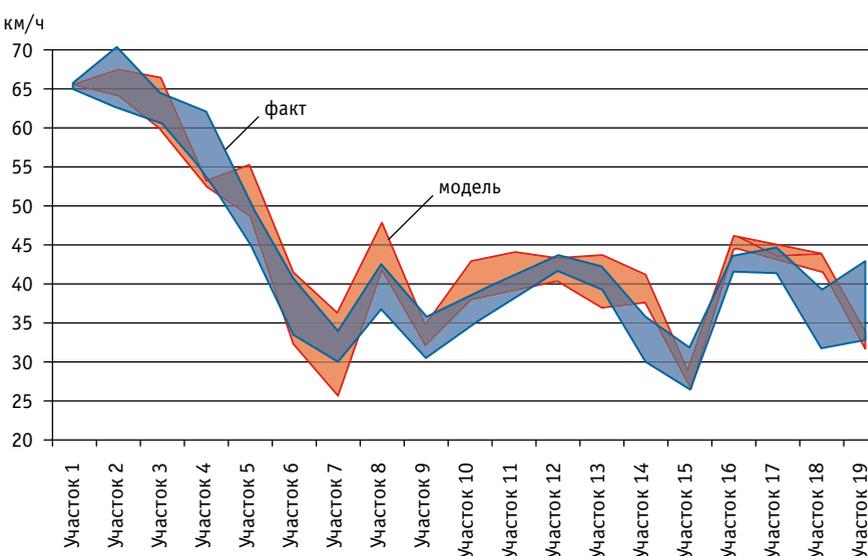


Рис. 5. Соотношение модельных и реальных скоростей движения поездов

торая вполне подробно отображает работу участков и полигонов и поэтому выдает довольно достоверные результаты. Пример того, в какой мере совпадают полученные с помощью имитационной модели и фактические скорости движения по участкам, представлен на рис. 5.

*Блок самообучения*

Параметры оптимизационных моделей могут определяться на основании статистики, накопленной в информационных хранилищах. Однако состояние транспортной системы в прогнозный период может отличаться от фактических средних значений. Кроме того, по новым корреспонденциям потоков статистические данные могут отсутствовать. В таких случаях целесообразно использовать результаты имитационных расчетов. Параметры в оптимизационной модели корректируются, и расчет в ней выполняется со скорректированными параметрами. То есть происходит процесс самообучения оптимизационной модели в адаптивной САУ (рис. 6). На основании результатов работы диспетчер сможет принимать более эффективные решения.

**ВЫВОДЫ**

Для того чтобы автоматизированные системы действительно помогли диспетчеру принимать лучшие решения, в них необходимо включить оптимизационные модели. Анализ показал, что такие модели созданы, но технология их использо-

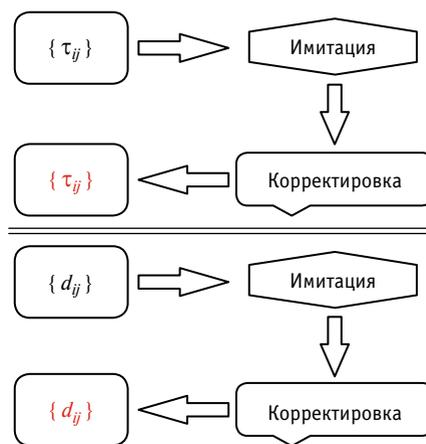


Рис. 6. Корректировка параметров модели как ее самообучение:

$\tau_{ij}$  — время хода;  
 $d_{ij}$  — пропускная способность

вания еще не разработана. Решение этой задачи связано с выбором класса моделей и обоснованием сферы их эффективного применения. Корректировка параметров оптимизационных моделей производится по результатам имитационных расчетов, и здесь возникает проблема выбора имитационной системы. Именно разработка технологии взаимодействия оптимизационных и имитационных моделей для корректировки параметров в задачах оптимизации и технологии самообучения позволит построить активную автоматизированную систему управления транспортными потоками.

## Литература

1. Мишарин А. С. Информационные технологии — главное условие совершенствования управления перевозками // Железнодорожный транспорт. 2001. № 6. С. 12–19. ISSN 0044–4448.
2. Левин Д. Ю. Диспетчерские центры и технология управления перевозочным процессом. Москва : Маршрут, 2005. 760 с.
3. Координационно-логистические центры / В. М. Николашин, С. Ю. Елисеев, А. С. Сеницына, Е. П. Шмугляков; под ред. В. М. Николашина и С. Ю. Елисева. Москва : УМЦ ЖДТ, 2013. 228 с.
4. Козлов П. А., Тушин Н. А., Чернышев К. А. Модели для построения интеллектуальной информационной среды на железнодорожном транспорте // Вестник РГУПС. 2015. № 1. С. 86–92. ISSN 0201–727X.
5. Козлов П. А., Миловидов С. П. Оптимизация структуры транспортных потоков в динамике при приоритете потребителей // Экономика и математические методы. 1982. Т. XVIII. Вып. 3. С. 521–531. ISSN 0424–7388.
6. Козлов П. А., Мишарин А. С. Двухуровневая модель управления грузопотоками на железнодорожном транспорте // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2002. № 5. С. 136–145. ISSN 0002–3388.
7. Об использовании моделей оптимального управления транспортными потоками / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Н. А. Тушин, О. В. Осокин // Вестник УрГУПС. 2019. № 1 (41). С. 60–69. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-1-60-69. ISSN 2079–0392.
8. Козлов П. А., Тушин Н. А., Копылова Е. В. Динамическое согласование в системе «производство — транспорт — потребление» // Транспорт Урала. 2018. № 4 (59). С. 3–6. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-3-6. ISSN 1815–9400.
9. Козлов П. А., Вакуленко С. П., Козлова В. П. Модель адаптивного взаимодействия станций в транспортном узле // Транспорт Урала. 2021. № 3 (70). С. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-3-7. ISSN 1815–9400.
10. Колокольников В. С., Слободянюк И. Г. Технология макромоделирования полигонов // Транспорт Урала. 2019. № 3 (62). С. 48–51. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-48-51. ISSN 1815–9400.
11. Козлов П. А., Козлова В. П., Кол С. Н. Технология исследования больших полигонов железных дорог на имитационных моделях // Транспорт: наука, техника, управление. 2021. № 4. С. 55–58. ISSN 0236–1914.

## References

1. Misharin A. S. Information technology is a fundamental term for improving transportation management [Informatsionnye tekhnologii — glavnoe uslovie sovershenstvovaniya upravleniya perevozkami] // Railway Transport. 2001. No. 6. Pp. 12–19. ISSN 0044–4448.
2. Levin D. Yu. Dispatch centers and transportation process management technology [Dispetcherskie tsentry i tekhnologiya upravleniya perevochnym protsessom]. Moscow : Route, 2005. 760 p.
3. Coordination and logistics centers [Koordinatsionno-logisticheskie tsentry] / V. M. Nikolashin, S. Yu. Eliseev, A. S. Sinitsyn, E. P. Shmuglyakov; ed. by V. M. Nikolashin & S. Yu. Eliseev. Moscow : UM Ts ZhDT, 2013. 228 p.
4. Kozlov P. A., Tushin N. A., Chernyshev K. A. Models for construction of intellectual information protection on railways [Modeli dlya postroeniya intellektual'noy informatsionnoy sredy na zheleznodorozhnom transporte] // Vestnik RGUPS. 2015. No. 1. С. 86–92. ISSN 0201–727X.
5. Kozlov P. A., Milovidov S. P. Optimization of transport flows structure in flow dynamics at the priority of consumers [Optimizatsiya struktury transportnykh potokov v dinamike pri prioritete potrebitel'ey] // Economics and Mathematical Methods. 1982. Vol. XVIII. No. 3. Pp. 521–531. ISSN 0424–7388.
6. Kozlov P. A., Misharin A. S. The two-level model of cargo management [Dvukhurovnevaya model' upravleniya gruzopotokami na zheleznodorozhnom transporte] // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2002. No. 5. Pp. 136–145. ISSN 0002–3388.
7. On using effective management models for transport flows [Ob ispol'zovaniy modeley optimal'nogo upravleniya transportnymi potokami] / P. A. Kozlov, V. S. Kolokolnikov, N. A. Tushin, O. V. Osokin // Herald of USURT. 2019. No. 1 (41). Pp. 60–69. DOI: 10.20291/2079-0392-2019-1-60-69. ISSN 2079–0392.
8. Kozlov P. A., Tushin N. A., Kopylova E. V. Dynamic coordination in «production — transport — consumption» system [Dinamicheskoe soglasovanie v sisteme «proizvodstvo — transport — potrebleniye»] // Transport of the Urals. 2018. No. 4 (59). Pp. 3–6. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-3-6. ISSN 1815–9400.
9. Kozlov P. A., Vakulenko S. P., Kozlova V. P. Model of adaptive interaction of stations in transport node [Model' adaptivnogo vzaimodeystviya stantsiy v transportnom uzle] // Transport of the Urals. 2021. No. 3 (70). Pp. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-3-7. ISSN 1815–9400.
10. Kolokolnikov V. S., Slobodyanyuk I. G. Technology of polygons macromodelling [Tekhnologiya makromodelirovaniya poligonov] // Transport of the Urals. 2019. No. 3 (62). Pp. 48–51. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-48-51. ISSN 1815–9400.
11. Kozlov P. A., Kozlova V. P., Kol S. N. Technology for research of large railways networks on simulation models [Tekhnologiya issledovaniya bol'shikh poligonov zheleznykh dorog na imitatsionnykh modelyakh] // Transport: science, equipment, management. 2021. No. 4. Pp. 55–58. ISSN 0236–1914.

Объем статьи 0,6 авторских листа

УДК 629.44

**Александр Васильевич Смольянинов, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,**  
**Виталий Федорович Кармацкий, доцент кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,**  
**Олег Вячеславович Черепов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия**

## ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕКУЩЕГО ОТЦЕПОЧНОГО РЕМОНТА ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

**Alexander Vasilyevich Smolyaninov, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,**  
**Vitaliy Fedorovich Karmatskiy, Associate Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,**  
**Oleg Vyacheslavovich Cherepov, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia**

### Organizational and technological aspects of current uncoupling repair of freight railway cars

#### Аннотация

В статье представлен ретроспективный анализ организационно-структурных преобразований в вагонном хозяйстве железнодорожного транспорта за последние 15 лет и формирования новых подходов к взаимодействию владельца инфраструктуры, перевозчиков, операторов, вагоноремонтных компаний в сфере эксплуатации и ремонта грузовых вагонов.

Сделан обзор различных подходов к решению проблем текущего отцепочного ремонта вагонов и их эволюции за последние 15 лет, проанализированы мнения компетентных специалистов. Представлен комментарий авторов на подготовленный Министерством транспорта Российской Федерации проект приказа о порядке проведения текущего отцепочного ремонта грузовых вагонов, а также на последние изменения в руководящих документах Совета по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества. Внесены конкретные предложения по совершенствованию нормативных документов, оказывающих регулирующее воздействие на процесс эксплуатации и ремонта грузовых вагонов.

**Ключевые слова:** грузовой вагон, эксплуатация, техническое обслуживание, плановые виды ремонта, текущий отцепочный ремонт, вагоноремонтное производство, структурные преобразования, оператор, владелец инфраструктуры, перевозчик.

#### Abstract

The article presents a retrospective analysis of organizational and structural transformations in the railcar industry over the past 15 years and the formation of new approaches to interaction of an infrastructure owner, carriers, operators, car repair companies in the field of operation and repair of freight railway cars.

An overview of various approaches to addressing the challenges of the current uncoupling repair of railcars and their evolution over the past 15 years has been made, the opinions of competent specialists have been analyzed. The authors' comments on the draft order prepared by the Ministry of Transport of the Russian Federation on the procedure for carrying out the current uncoupling repair procedures of freight cars, as well as on the latest changes in the governing documents of the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States are presented. Specific proposals are made to improve regulatory documents which have a regulatory impact on the operation and repair of freight cars.

**Keywords:** freight car, operation, maintenance, scheduled repairs, current uncoupling repairs, railway car repair production, structural transformations, operator, infrastructure owner, carrier.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-8-15



**В**ажнейшей составляющей поддержания вагона в рабочем состоянии в период между плановыми видами ремонта является его техническое обслуживание в пути следования и проведение текущего отцепочного ремонта (ТОР) (в случае отказа). ТОР выполняется на отведенных для этого железнодорожных путях — либо открытых, либо находящихся в специальных закрытых пунктах. На рис. 1 данный объект обозначен как МПРВ — механизированный пункт ремонта вагонов. Представленный вариант размещения путей текущего отцепочного ремонта классический для железнодорожного транспорта.

Вагоны с обнаруженными неисправностями, находящиеся как в порожнем, так и в груженом состоянии, отцепляются и подаются на пути пунктов ТОР, где устраняются мелкие и средние неисправности, возникшие в процессе эксплуатации. Отцепка неисправных вагонов производится во всех парках станции (О, С и П\*), а также от транзитных поездов (ТР1 и ТР2).

Транспортировка грузов по железным дорогам осуществляется на основании договора между перевозчиком (владельцем инфраструктуры) и оператором подвижного состава. При этом на перевозчика возлагаются обязанности по сохранности груза и вагона, а также по сроку доставки груза от станции отправления до станции назначения.

До недавнего времени пункты текущего отцепочного ремонта (ПТОР) относились исключительно к инфраструктуре железнодорожного транспорта общего пользования. Являясь структурными подразделениями эксплуатационных вагонных депо (ВЧДЭ), они были неотъемлемой частью перевозочного процесса.

В 2005 г. произошли принципиальные изменения в структуре управления вагонным хозяйством ОАО «РЖД». Вагонные депо разделились на ремонтные (ВЧДР) и эксплуатационные (ВЧДЭ). Две трети ремонтных предприятий сформировали отдельный хозяйствующий субъект: Центральную дирекцию по ремонту грузовых вагонов (ЦДВР) — филиал ОАО «РЖД». В последующем на базе имущества ЦДВР были организованы три вагоноремонтные компании в форме дочерних акционерных обществ — ВРК-1,-2,-3 [1]. Параллельно стали создаваться частные вагоноремонтные предприятия, независимые от перевозчика и владельца инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Это решение позволило подойти к организации плановых ремонтов вагонов с учетом рыночной экономики и повысить

эффективность работы ремонтных предприятий при сохранении необходимого качества ремонта.

В 2019–2020 гг. две дочерних ремонтных компании были проданы частному бизнесу, а в составе холдинга РЖД осталось только АО «ВРК-1», на долю которого сегодня приходится порядка 18 % плановых видов ремонта грузовых вагонов. В данной ситуации собственник вагонов может сам выбирать исполнителя для выполнения плановых видов ремонта.

Вместе с тем при стабилизации положения с плановыми видами ремонта в процессе реформирования остались неурегулированными вопросы организации текущего ремонта вагонов, отцепленных от составов в пути следования по неисправностям, угрожающим безопасности движения поездов. По-прежнему ежегодно наблюдается рост числа отцепок в ТОР, причем, согласно прогнозам специалистов холдинга «РМ Рейл», к 2027 г. отцепки вагонов в ТР-1 и ТР-2 могут превысить 1,5 млн [2].

Несовершенство нормативно-правовой базы, оказывающей административное регулирующее воздействие на взаимоотношения всех участников перевозочного процесса, имеющих свои интересы, не позволяет пока изменить ситуацию, сложившуюся в сфере текущего отцепочного ремонта вагонов.

До сих пор в действующих документах на законодательном и отраслевом уровне нет четких ответов на многие вопросы, связанные с организацией ТОР, что не устраивает ни операторское, ни вагоноремонтное сообщества. Например, согласно существующим нормативам, при отцепке вагона в ТОР в пути следования собственник вагона лишен права выбора исполнителя работ, и ввиду того что вагон угрожает безопасности движения, он подлежит отправке в ближайшее эксплуатационное вагонное депо для ремонта по ценам, действующим на данном предприятии [3].

Учитывая все вышесказанное, авторы поставили перед собой цель провести ретроспективный обзор различных подходов к решению проблем ТОР за последние 15 лет, проанализировать мнения компетентных специалистов об изменениях в организации текущего ремонта вагонов и принять участие в подготовке предложений по совершенствованию нормативных документов, оказывающих регулирующее воздействие на процесс ТОР.

Проблемы текущего отцепочного ремонта стали проявляться уже на начальном этапе реформирования вагонного комплекса — при массовом появлении частных вагонов на сети железных дорог. К середине 2007 г. парк таких вагонов

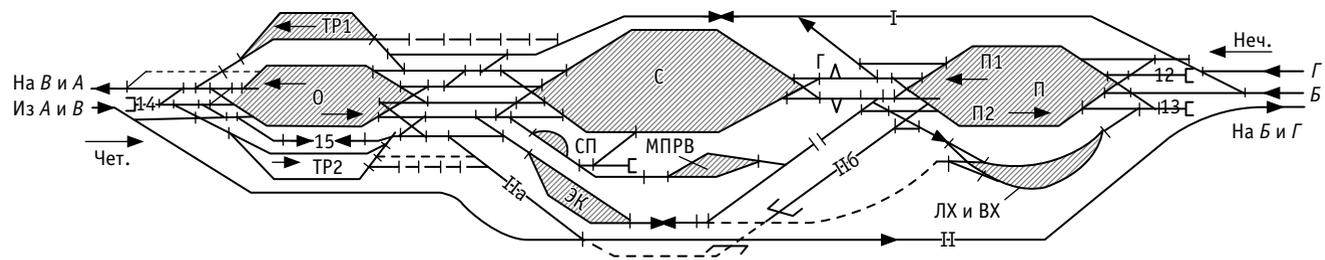


Рис. 1. Схема односторонней сортировочной станции\*

\*Сокращения не раскрыты ввиду их очевидности.

составлял 328736 единиц, причем частные операторы работали только в высокодоходных сегментах рынка (перевозка нефтепродуктов, минеральных удобрений). В этих условиях департамент и службы вагонного хозяйства РЖД приступили к формированию рынка услуг по техническому обслуживанию, текущему отцепочному ремонту грузовых вагонов и обеспечению равного доступа к нему владельцев вагонов, что напрямую повлияло бы на уровень объема железнодорожных грузоперевозок [4]. Но поставленную задачу решить не удалось и в последующие годы, потому что на законодательном и административном уровне не были отработаны механизмы взаимодействия участников зарождающихся бизнес-процессов.

Суть проблем состояла в следующем:

некоторые владельцы пытались снизить затраты на поддержание своих вагонов в работоспособном состоянии за счет других участников, в том числе не оплачивали текущий отцепочный ремонт, мотивируя тем, что он уже включен в грузо-перевозочные тарифы;

ряд собственников отказывались от заключения договоров и предоплаты за ремонт;

выявлялись факты необоснованной отцепки вагонов на ПТО. При диагностике забракованной детали (узла) в стационарных условиях вагоноремонтных депо неисправность, послужившая причиной отцепки, не подтверждалась (например, отцепка по грению букс). Основания для таких выводов у операторов были. Так, по данным Института проблем естественных монополий, во втором квартале 2013 г. на сети РЖД в ТОР было отцеплено около 312 тыс. вагонов, из них неподтвержденными оказались порядка 38 тыс. случаев. Основными причинами отцепок были неисправности литых деталей тележек и буксовых узлов. Следует отметить, что на сети дорог регулярно и оперативно рассматривались случаи необоснованных отцепок на местах, проводились еженедельные сетевые селекторные совещания по анализу работы эксплуатационных вагонных депо, принимались меры по исключению подобных случаев [5].

В этот период при отцепке в ТОР вагон ремонтировали на ближайшем пункте того же самого эксплуатационного депо, которое вагон забраковало. Все свои расходы эксплуатационные вагонные предприятия полностью предъявляли к оплате собственнику вагона, при этом для депо не было никаких сдерживающих факторов по определению цены ремонта [6]. Считались частными случаями, когда ремонт вагонов осуществлялся эксплуатационным депо не общим потоком, а выборочно, по остаточному принципу (т.е. предприятие отдавало предпочтение определенному собственнику или дочерним обществам ОАО «РЖД»).

С 1 января 2011 г. ОАО «РЖД» ввело единую ставку на текущий отцепочный ремонт. Однако большинство операторов считали ее завышенной из-за вопиющих фактов выполнения ремонта, не соответствующего установленным требованиям качества работ по ТОР, что приводило к повторным отцепкам вагонов [6].

Например, согласно данным АО «Первая Грузовая Компания», из-за отсутствия в эксплуатационных депо необходимого оборотного запаса исправных боковых рам и наддресорных балок в текущем ремонте по сети простаивало 17 % от всех от-

цепленных в ТОР вагонов компании, а из-за отсутствия необходимого количества исправных колесных пар — 39 %. Вагоны АО «Первая Грузовая Компания», забракованные в ТОР по неисправностям колесных пар и литых деталей тележек, простаивали в ожидании текущего ремонта до 30 сут [6].

Анализ публикаций по проблемам текущего отцепочного ремонта в профессиональных изданиях и в средствах массовой информации позволяет сделать вывод, что в 2015 г. операторы железнодорожного подвижного состава сформулировали следующие основные проблемы ТОР.

#### 1. Технические проблемы:

отсутствие в нормативных документах регулирующих органов исчерпывающего перечня неисправностей, требующих безусловной отцепки вагона от поезда в пути следования;

несовершенство средств диагностики на ПТО и, как следствие, необоснованные отцепки, когда в ремонт направляются исправные вагоны, а их владельцу выставляется счет за якобы проведенный ремонт;

приписки объемов ремонта, куда включены работы, которые фактически не выполнялись;

слабая технологическая оснащенность ПТО эксплуатационных депо (ремонт производится под открытым небом, в любую погоду и, как говорится, «на коленке»);

требование оплаты за ремонт (подача-уборка вагона, регламентные и прочие работы) по вагонам, отцепленным с неподтвержденными дефектами;

отказ согласовывать с владельцем вагонов замену дорогостоящих деталей, проведение дорогостоящих операций.

#### 2. Финансово-экономические проблемы:

запрет на внесение корректировок в договор на текущий ремонт грузовых вагонов. Договор заключается только на условиях ОАО «РЖД»;

отказы владельцам небольшого количества вагонов в заключении централизованного договора на ТОР;

отсутствие клиентоориентированности, так как договор, заключенный с определенной железной дорогой, не распространяет свои договорные отношения на другие дороги, хотя все они являются филиалами одной организации — ОАО «РЖД»;

необходимость зачисления денежных средств для расчетов на счета каждой из дорог в отдельности;

постоянный рост цен на услуги по ТОР.

Выявлена и еще одна распространенная ситуация: инспекторы ОАО «РЖД» по сохранности вагонов не имеют прямой заинтересованности в сохранности тех вагонов, которые не принадлежат холдингу. Вместо того чтобы составлять акт о повреждении вагонов при погрузке или выгрузке, при приемке с подъездных путей и тем более на сортировочных станциях (что требует оформления документов о повреждении на ОАО «РЖД»), им выгоднее принять позицию эксплуатационного депо — забраковать вагоны по неисправности, направить в текущий ремонт и взять за него деньги с владельца подвижного состава [7].

Избавившись от собственного вагонного парка, ОАО «РЖД» получило мощный стимул возложить на независимых владельцев дополнительную нагрузку за ремонт: чем больше вагонов будет отремонтировано, тем больше ОАО «РЖД» на этом зара-

ботаает. То есть рост текущих ремонтов является искусственным хотя бы потому, что к этому располагает сама процедура организации ТОР, когда само ОАО «РЖД» признает вагон неисправным, само его ремонтирует и само разрешает выпуск вагонов из ремонта [6].

В 2015–2016 гг. поиск вариантов по изменению ситуации с ТОР был продолжен. Крупнейшие транспортные компании и операторы подвижного состава считали, что лучшим решением всех проблем текущего отцепочного ремонта было бы включение расходов на его проведение в тариф на перевозку грузов, потому что только в таком случае ОАО «РЖД» будет заинтересовано в минимизации стоимости ТОР, а значит, исключается мотивация к необоснованным отцепкам [5]. Но реализация предложения не была поддержана холдингом.

В этот период стало очевидным, что в корне изменилась вся система взаимоотношений на рынке транспортных услуг, зоны ответственности поделены между многими его участниками, но организация обслуживания и ремонта подвижного состава не претерпела существенных преобразований (рис. 2).

Отрицательные процессы в системе отцепочного ремонта, начавшиеся в 2013–2014 гг., резко усилились в 2017–2018 гг., когда ОАО «РЖД» инициировало предпродажную подготовку ВРК-2 и ВРК-3, в том числе увеличивая объемы отцепок, стоимость ремонта и повышая маржинальность рынка ТОР.

За пять лет, с 2013 по 2018 г., затраты на ремонт увеличились в 4,5 раза. Если в 2012 г. средняя цена ТОР одного вагона составляла 13,2 тыс. руб., то в 2015-м — уже 18,3 тыс. руб. В 2017 г. цена ТОР типа ТР-2 выросла более чем на 10 % — до 23,5 тыс. руб. на вагон. Согласно данным АО «Первая Грузовая Компания», по итогам 2017 г. ремонт по отношению к предыдущему году подорожал на 6 %, а за первое полугодие 2018 г. рост уже составил около 12 % [6].

С 2017 г. ОАО «РЖД» начало реорганизацию системы текущего отцепочного ремонта, передавая его часть только вагоноремонтным депо холдинга. Предполагалось, что впоследствии ТОР будет полностью передан в ведение вагоноремонтного комплекса РЖД. Но доля это-



Рис. 2. Ремонт вагонов на специализированных путях текущего отцепочного ремонта

го комплекса на вагоноремонтном рынке составляла не более 60 % и стала быстро сокращаться в пользу независимых вагоноремонтных компаний. Принятые в РЖД решения по реформированию системы ТОР, которая уже не отвечала требованиям времени, вызвали широкое обсуждение в СМИ и неоднозначную реакцию участников. По мнению ряда руководителей частных вагоноремонтных компаний, попытка РЖД передать ТОР из эксплуатации в ремонтные компании холдинга не совсем правильна, потому что ремонтное депо специализируется на плановых видах и больших объемах ремонта, а ТОР — это мелкий ремонт, который подразумевает в том числе необязательную выгрузку груза из вагона [6, 8].

Операторами подвижного состава оспаривалось монопольное право единственного владельца инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования и перевозчика на выполнение работ по текущему отцепочному ремонту грузовых вагонов.

Постоянные судебные иски сопроваждали процесс взаимодействия между собственниками вагонов и структурными подразделениями ОАО «РЖД». Вот два характерных примера судебных решений, подтверждающих такие факты:

применение ОАО «РЖД» различных уровней рентабельности при установлении стоимости ТОР вагонов собственности хозяйствующих субъектов, входящих в одну группу лиц с ОАО «РЖД», и иных собственников грузовых вагонов созда-

ет для последних (не входящих в одну группу лиц с ОАО «РЖД») дискриминационные условия;

во исполнение условий договора подрядчиком выполнен текущий ремонт колесной пары грузового вагона заказчика. В связи с обнаружением дефекта отремонтированной колесной пары в период гарантийной эксплуатации грузового вагона он был отцеплен работниками отделения железной дороги для проведения текущего отцепочного ремонта.

В числе других причин, по которым нельзя приватизировать ТОР и выводить его полностью в частный бизнес, по мнению операторов и собственников вагонов, назывались следующие.

1. Преждевременно принимать решение о передаче ТОР вагоноремонтным компаниям. Надо искать потерянную эффективность, которой обладала система ТОиР в годы существования министерства путей сообщения.

2. Приватизация системы ТОР грозит разрывом непрерывного перевозочного процесса и увеличением сроков простоя в ремонте, расстояния следования неисправного вагона в ремонт, стоимости перевозки.

3. Классификатор неисправностей КЖА устанавливает три причины возникновения ТОР: 1 — эксплуатационная, 2 — технологическая, 3 — повреждение. Ремонт по эксплуатационным неисправностям несет владелец вагона, притом что причины, не связанные с низким качеством изготовления или планового

ремонта, могут быть различными и зависят от предприятий инфраструктуры и перевозчика. По указанным причинам отцепки не расследуются и акты-рекламации не оформляются. В результате финансовой безнаказанности снижается ответственность, а мероприятия, которые могли бы предотвратить возникновение этих причин в будущем, не проводятся. Прежде всего именно поэтому операторы сопротивляются приватизации участков текущего отцепочного ремонта.

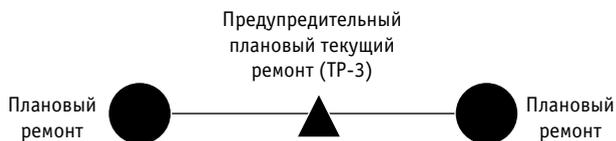
4. Сегодня перевозчик, скорее всего, проводит внутреннее расследование и делает выводы, но если ТОР полностью вывести в частный бизнес, то это грозит абсолютным отсутствием мер профилактики [9].

Высказывались мнения о том, что планово-предупредительная система ремонта перестала быть по сути предупредительной. Фактически одновременно работают две системы ремонта: и предупредительная, и по техническому состоянию.

Вносились предложения о том, что в систему планово-предупредительного ремонта нужно добавлять еще один вид планового ремонта, например: в объеме текущего, профилактический или оздоровительный по сути.

Такая позиция подтверждается положительными результатами эксплуатации. Например, с 2018 г. порожние полувагоны парка компании «Восток 1520», имеющие пробег более 500 тыс. км и находящиеся в предотказном состоянии по толщине гребня, направляются из портов Октябрьской и Северо-Кавказской железных дорог в вагонное ремонтное депо «Черемхово», где производится осмотр автосцепного устройства, проверка тормоза, а также обтачиваются все колесные пары. Чтобы максимально отсрочить заход вагонов в следующий ТОР, обточка колес проводится на толщину гребня 33 мм. Пробег вагонов после такого обслуживания уже приближается к отметке 200 тыс. км. Причем отцепок в ТОР за этот период не отмечено, что свидетельствует не только о правильности и целесообразности такой работы, но и о необходимости пересмотреть подходы к системе ремонта вагонов нового поколения [10].

Практический опыт ряда компаний и исследования ученых ВНИИЖТ позволили предложить еще один вариант повышения работоспособности вагона путем оптимизации системы ремонта и внесения в нормативные документы планового текущего ремонта в объеме ТР-3. Такой сценарий предполагает новую схему подачи вагонов в депо для ремонта, при которой в межремонтном периоде проводится промежуточный (плановый) текущий ремонт (рис. 3).



**Рис. 3. Структура межремонтного цикла оптимизированной системы ремонта [9]**

Благодаря сбалансированности мероприятий по поддержанию технического состояния грузового вагона в межремонтном периоде его общий пробег за этот период сможет увеличиться до 210 тыс. км вместо нынешних 160 тыс. км без

каких-либо модернизаций конструкции [10]. То есть при пробеге в 210 тыс. км можно обойтись как минимум без двух отцепок вагона в ТОР, что позволит вагоноремонтным предприятиям спланировать свою деятельность и инвестиции, а владельцам вагонов — избежать расходов на два ТОР.

Предложенная система была учтена Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества. В 2020 г. внесены изменения в Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении. В документе добавлен новый вид планового ремонта грузовых вагонов — текущий отцепочный ремонт ТР-3, целями которого являются частичное восстановление ресурса колесных пар, автосцепного устройства и контроль за техническим состоянием автотормозного оборудования вагонов. Постановление на ТР-3 осуществляется по установленным нормативам. Так, документом установлен норматив периодичности проведения ТР-3 для грузовых вагонов на тележках модели 18–9855 в условиях применения комбинированного критерия с пробегом 600 тыс. км в межремонтные периоды после постройки, капитального или депоовского ремонта.

В противовес этому нововведению частная компания «Новотранс» предлагает уникальный пакет услуг, включающий расширенную гарантию на отремонтированный подвижной состав и сервисное сопровождение вагонов в межремонтный период, при котором риск возможных ТОР компания берет на себя. В данном случае сама вагоноремонтная компания заинтересована предоставлять услуги такого качества, чтобы вагон проходил без отцепки между двумя плановыми ремонтами.

Поступают и другие предложения по изменению положения с текущим ремонтом вагонов.

Сложившаяся ситуация, когда количество частных предприятий резко выросло и они порой вынуждены демпинговать в конкурентной борьбе, создает условия для увеличения на рынке гораздо более дешевых деталей, изготовленных с нарушением технологического цикла или с выработанным ресурсом [11]. Общеизвестным фактом является повторное использование пружин рессорного подвешивания после 16-летнего срока эксплуатации. ОМК «Стальной путь» считает необходимым определить в ремонтной документации четкие сроки службы и периодичности (ресурса) замены узлов и деталей ходовых частей, в том числе пружин, и запретить при всех видах ремонтов вагонов замену неисправных пружин на пружины б/у.

В настоящее время позиции всех основных участников транспортного комплекса по организации текущего отцепочного ремонта грузовых вагонов изменились. Как уже отмечалось, доля ТОР на частных предприятиях растет, тогда как еще недавно здесь доминировали структуры РЖД. В 2022 г. на вагонные эксплуатационные депо Центральной дирекции инфраструктуры приходилось 56 % объема текущего ремонта, на ВРК-1 — 11,4 % [2]. На сети железных дорог функционирует более 550 пунктов ТОР, выполняющих текущий ремонт около 1,3 млн вагонов в год. Владельцу инфраструктуры принадлежат 44 % ПТОР, а 56 % — вагоноремонтным компаниям всех форм собственности [12].

По состоянию на январь 2021 г. изменение структуры владения отраслью таково: доля частного бизнеса уже составляет около 82 %, а принадлежащие ОАО «РЖД» ВРК-1 и предприятия ЦДИ, которые проводят текущие отцепочные ремонты, занимают лишь порядка 18 %. Но, несмотря на изменение структуры владения отраслью и падение объемов перевозок, количество отцепок в ТОР продолжает расти на 6,4 % — до 1,024 млн случаев.

В сложившейся ситуации авторы считают недостаточным обсуждение проблем ТОР на уровне общественных советов, конференций и совещаний. Эти проблемы должны решаться при активном участии административно-регулирующих органов сферы транспорта. Определенные шаги в данном направлении уже сделаны. Например, в 2018 г. в статью 2 Федерального закона от 10.01.2003 г. № 18-ФЗ (в редакции от 28.02.2023 г.) «Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации» было внесено толкование термина «текущий отцепочный ремонт грузовых вагонов» как ремонт груженых или порожних грузовых вагонов, проводимый с отцепкой таких вагонов в пути следования в целях восстановления их работоспособности и предусматривающий замену или восстановление отдельных составных частей таких вагонов [13].

В августе 2020 г. был подписан приказ Министерства транспорта Российской Федерации о правилах текущего отцепочного ремонта, подготовка и обсуждение которого активно велись с 2017 г. По мнению многих участников, имеющих отношение к системе текущего ремонта, документ не давал ответы на основные спорные вопросы: кто должен иметь право на такие работы — ОАО «РЖД» или частные ремонтные депо, как оценить корректность решения монополии об отцепке или определить виновного в дефекте [8, 14, 15].

Согласно этому приказу, ОАО «РЖД» должно было передать участки ТОР в аренду вагоноремонтным компаниям. При этом операторы опасались, что передача ремонта в частные руки может привести к тому, что цены и сроки вырастут, а качество и сохранность груза снизятся. Операторы хотели видеть в приказе закрепление права выполнения ТОР за ОАО «РЖД», а монополия — за любыми лицами, в том числе за независимыми депо. Но в документе эти позиции не были отражены, так как по Уставу железнодорожного транспорта определение лица, осуществляющего ТОР, не может быть предметом приказа. Приказ не предусматривал механизмов контроля за обоснованностью отцепок, хотя этот вопрос неоднократно фиксировался в протоколах совещаний, проводимых при обсуждениях проекта [14].

В конечном счете стало очевидным, что документ не соответствует реалиям времени, поэтому в ноябре 2020 г. приказ был отменен, после чего началась новая дискуссия по его доработке.

В феврале 2023 г. на официальном портале проектов нормативных актов выставлен доработанный новый проект приказа Минтранса. Обсуждение приказа завершено, он проходит процедуру окончательной доработки и оформления. Предполагается, что подписанный приказ вступит в силу с 1 сентября 2023 г. [16].

В документе учтены многие предложения участников обсуждения. Он содержит описание процесса отцепки грузового вагона

на при обнаружении неисправности, то, куда вагон направляется для ремонта и в каком виде выходит из ремонта. Регламентируется порядок взимания ОАО «РЖД» платы за отцепку и прицепку вагонов, если дефект возник не по его вине. Но, по мнению экспертов ряда министерств и ведомств, определяющих регулирующее воздействие приказа, не все предложения вагоноремонтного, операторского сообществ и ОАО «РЖД» в нем учтены.

Несмотря на то что вагоноремонтный комплекс претерпел значительные изменения, в большей степени перейдя под контроль частного бизнеса, основные отрицательные тенденции в системе текущего ремонта вагонов пока не ликвидированы.

Независимо от падения погрузки и пробега доля ТОР продолжает расти. Но в условиях кризиса частные компании собираются решать старые проблемы за счет предложения операторам новых услуг.

Таким образом, тема текущего отцепочного ремонта по-прежнему вызывает острые дискуссии. За последнее время накопилось очень много замечаний к проведению ТОР, и большинство игроков рынка считают, что в этой сфере нужны серьезные преобразования, от качества реализации которых будет зависеть степень удовлетворенности собственников в данных услугах. Постепенное вхождение в сферу ТОР различных участников с учетом всех рисков и совершенствование нормативного обеспечения этого процесса со временем преобразует монополю на оказываемую РЖД услугу в конкурентный сектор.

С сентября 2023 г. после вступления в силу подписанного приказа Минтранса предполагается следующая система организации ТОР.

1. Текущий отцепочный ремонт груженых грузовых вагонов осуществляется владельцем инфраструктуры (перевозчиком) на основании договора с оператором (владельцем) вагона в ближайшем от места отцепки вагона пункте проведения ремонта.

2. Текущий отцепочный ремонт порожних грузовых вагонов осуществляется владельцем инфраструктуры (перевозчиком) на основании договора с оператором (владельцем) грузового вагона;

при отсутствии технологической возможности выполнения ремонта на ближайшем пункте ТОР, принадлежащем владельцу инфраструктуры (перевозчику), по решению сторон допускается проведение ремонта на ближайшем пункте ТОР;

в случае если ближайший к месту отцепки пункт текущего отцепочного ремонта не принадлежит владельцу инфраструктуры, то ремонт может быть выполнен на основании договора между оператором (владельцем) грузового вагона и пунктом текущего отцепочного ремонта, не принадлежащего владельцу инфраструктуры (перевозчику).

3. Одним из решений может стать переход на эксплуатацию вагонов по контракту жизненного цикла, который будет заключаться с производителем вагонов или ремонтным предприятием.

Вопрос о необходимости текущего отцепочного ремонта напрямую связан с безопасностью движения, в которой заинтересованы все участники перевозочного процесса. Поэтому каждая проверка, итогом которой становится отправка вагонов в ТОР, должна проводиться беспристрастно, грамотно, в соответствии с профессионально разработанными регламентами и установками.

## Литература

1. Смольянинов А. В., Кармацкий В. Ф., Волков Д. В. Анализ организационно-структурных преобразований вагоноремонтных предприятий // Инновационный транспорт. 2022. № 4 (46). С. 37–43. DOI: 10.20291/2311-164X-2022-4-37-43. ISSN 2311–164X.
2. Усов П. Рынок вагоноремонтных услуг на 75 % частный. URL: <https://spec.rzd-partner.ru/page31410636.html> (дата обращения: 22.02.2023).
3. Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении: утв. Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества, протокол от 16–17 октября 2012 г. № 57 (Приложение № 11) (в ред. Протокола № 74 заседания Совета по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества от 08.06.2021 г.). URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/15/11080?type=15> (дата обращения: 20.03.2022).
4. Калетин С. В. Отцепочный ремонт: правда и вымысел // Транспорт Российской Федерации. 2007. № 11. С. 59–61. ISSN 1994–831X.
5. Ханцевич Д. П. Как нам реорганизовать ТОР? // РЖД-Партнер. 2013. № 20 (264). С. 32–35.
6. Сам бракую, сам ремонтирую. URL: [http://www.railsovet.ru/news/industry\\_news/?ELEMENT\\_ID=3691](http://www.railsovet.ru/news/industry_news/?ELEMENT_ID=3691) (дата обращения: 22.01.2023).
7. Чиганашкина И. В. Проблема сохранности грузовых вагонов и организации внепланового ремонта на сети РЖД. URL: [http://www.railsovet.ru/news/media\\_partnership/?ELEMENT\\_ID=216](http://www.railsovet.ru/news/media_partnership/?ELEMENT_ID=216) (дата обращения: 14.02.2023).
8. Задорожный М. РЖД отцепляют ТОР. Что вырастет на рынке текущего отцепочного ремонта: простои, цены, или и то и другое. URL: <https://vgudok.com/rassledovaniya/rzhd-otceplyayut-tor-chto-vyrastet-na-rynke-tekushchego-otcepochnogo-remonta-prostoi> (дата обращения: 21.02.2023).
9. Ярошевский М. И жить ТОРопится, и чувствовать спешит. Обзор ситуации с текущими отцепочными ремонтами от ВРК и РЖД от представителей рынка и экспертов. URL: <https://vgudok.com/lenta/i-zhit-toropitsya-i-chuvstvovat-speshit-obzor-situacii-s-tekushchimi-otcepochnymi-remontami-ot> (дата обращения: 03.03.2023).
10. Кузнецов М. А. Метод содержания грузовых вагонов в условиях разноресурсности их узлов, в том числе со значениями, превышающими межремонтные пробеги вагонов // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : материалы XVI Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 12–15 июля 2022 г. Санкт-Петербург : ПГУПС, 2022.
11. Плетнёв С. Ремонт затягивается // Гудок. 21 окт. 2020 г. С. 6.
12. Заключение Министерства экономического развития Российской Федерации об оценке регулирующего воздействия на проект Приказа Министерства транспорта Российской Федерации «Об утверждении Порядка проведения текущего отцепочного ремонта грузовых вагонов, включающего в себя критерии определения обеспеченности инфраструктуры же-

## References

1. Smolyaninov A. V., Karmatsky V. F., Volkov D. V. Analysis of organizational and structural transformations of railway car repair enterprises [Analiz organizatsionno-strukturnykh preobrazovaniy vagonoremontnykh predpriyatiy] // Innotrans. 2022. No. 4 (46). Pp. 37–43. DOI: 10.20291/2311-164X-2022-4-37-43. ISSN 2311–164X.
2. Usov P. The market of railway car repair services is 75 % private owned [Rynok vagonoremontnykh uslug na 75 % chastnyy]. URL: <https://spec.rzd-partner.ru/page31410636.html> (access date: 22.02.2023).
3. Regulations on the system of technical maintenance and repair of freight cars admitted to operation on public railways in international traffic [Polozhenie o sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta gruzovykh vagonov, dopushhenykh v obrashhenie na zheleznodorozhnyye puti obshchego pol'zovaniya v mezhdunarodnom soobshhenii] : approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Record No. 57 dated October 16–17, 2012 (Annex No. 11) (as amended Record No. 74 of the meeting of the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States dated 08.06.2021). URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/15/11080?type=15> (access date: 20.03.2022).
4. Kaletin S. V. Uncoupling repair: truth and fiction [Ottsepochnyy remont: pravda i vymysel] // Transport of the Russian Federation. 2007. No. 11. Pp. 59–61. ISSN 1994–831X.
5. Khantsevich D. P. How do we reorganize current uncoupling repairs? [Kak nam reorganizovat' TOR?] // RZD-Partner. 2013. No. 20 (264). Pp. 32–35.
6. I reject it as defective myself, I repair it myself [Sam brakuyu, sam remontiruyu]. URL: [http://www.railsovet.ru/news/industry\\_news/?ELEMENT\\_ID=3691](http://www.railsovet.ru/news/industry_news/?ELEMENT_ID=3691) (access date: 22.01.2023).
7. Chiganashkina I. V. The problem of the safety of freight cars and the organization of unscheduled repairs on the Russian Railways network [Problema sokhrannosti gruzovykh vagonov i organizatsii vneplanovogo remonta na seti RZhD]. URL: [http://www.railsovet.ru/news/media\\_partnership/?ELEMENT\\_ID=216](http://www.railsovet.ru/news/media_partnership/?ELEMENT_ID=216) (access date: 14.02.2023).
8. Zadorozhnyy M. Russian Railways unhook current uncoupling repairs. What will grow in the current uncoupling repair market: downtime, prices, or both [RZhD ottseplyayut TOR. Chto vyrastet na rynke tekushchego ottsepochnogo remonta: prostoi, tseny, ili i to i drugoe]. URL: <https://vgudok.com/rassledovaniya/rzhd-otceplyayut-tor-chto-vyrastet-na-rynke-tekushchego-otcepochnogo-remonta-prostoi> (access date: 21.02.2023).
9. Yaroshevskiy M. As it is in a hurry to live, as it is in a hurry to feel. Overview of the situation with current uncoupling repairs from Railway Car Repair Company and Russian Railways from market representatives and experts [I zhit' TORopitsya, i chuvstvovat' speshit. Obzor situatsii s tekushchimi ottsepochnymi remontami ot VRK i RZhD ot predstaviteley rynka i ekspertov]. URL: <https://vgudok.com/lenta/i-zhit-toropitsya-i-chuvstvovat-speshit-obzor-situacii-s-tekushchimi-otcepochnymi-remontami-ot> (access date: 03.03.2023).
10. Kuznetsov M. A. Method for maintenance of freight cars in conditions of different endurance capacity of their units, including the values exceeding the inter-repair runs of railcars [Metod soderzhaniya gruzovykh vagonov v usloviyakh raznoresursnosti ikh uzlov, v tom chisle so znacheniyami, prevyshayushimi mezhtremontnye probegi vagonov] // Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects : proceedings of the 16th International scientific and technical conference, St. Petersburg, July 12–15, 2022. St. Petersburg : PSTU, 2022.
11. Pletnev S. Repairs are being dragged on [Remont zatyagivaetsya] // Gudok. 2020. October 21. P. 6.
12. Statement of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation on the assessment of a regulatory impact on the draft Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation «On approval of the Procedure for carrying out the current uncoupling repair procedures of freight cars, which includes criteria for determining the availability of public railway transport infrastructure with points of current uncoupling repair of freight cars, a list of malfunctions of loaded or empty freight cars requiring current uncoupling repair of freight cars, the procedure for uncoupling and coupling of loaded or empty freight cars en route in order to carry out the current uncoupling repair of freight cars, the timing of the direction of loaded or empty freight cars for the current uncoupling repair of freight cars, as well as the procedure for determining the amount of payment to the carrier and (or) the owner of the infrastructure of public railway transport in connection with such uncoupling and coupling in case if a current uncoupling repair of freight cars was car-

лезнодорожного транспорта общего пользования пунктами текущего отцепочного ремонта грузовых вагонов, перечень неисправностей груженых или порожних грузовых вагонов, требующих текущего отцепочного ремонта грузовых вагонов, порядок отцепки и прицепки груженых или порожних грузовых вагонов в пути следования в целях проведения текущего отцепочного ремонта грузовых вагонов, сроки направления груженых или порожних грузовых вагонов на текущий отцепочный ремонт грузовых вагонов, а также порядок определения размера платы перевозчику и (или) владельцу инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования в связи с такими отцепкой и прицепкой в случае, если текущий отцепочный ремонт грузовых вагонов был проведен по причинам, не зависящим от перевозчика и (или) владельца инфраструктуры» от 26.01.2023 г. № 2143-АХ/Д26и. URL: <http://ivo.garant.ru/#/basesearch/текущего%20отцепочного%20ремонта%20грузовых...%22%20%20от%2026.01.2023%20г.%20№%202143-АХ%7СД26и:0> (дата обращения: 03.04.2023).

13. Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации : Федеральный закон от 10.01.2003 г. № 18-ФЗ (в ред. от 28.02.2023 г.). URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_303491/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_303491/) (дата обращения: 16.03.2023).
14. Скорлыгина Н. Рынок отцепился от текущих ремонтов. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4467808> (дата обращения: 24.03.2021).
15. Борисов Д. TOP: стратегия Минтранса идет вразрез с практикой и правом. URL: <https://vgudok.com/lenta/tor-strategiya-mintransa-idyot-vrazrez-s-praktikoy-i-pravom-specvypuskvgudokcom-tor> (дата обращения: 22.03.2021).
16. Проект Приказа Министерства транспорта Российской Федерации «Об утверждении Порядка проведения текущего отцепочного ремонта грузовых вагонов, включающего в себя критерии определения обеспеченности инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования пунктами текущего отцепочного ремонта грузовых вагонов, перечень неисправностей груженых или порожних грузовых вагонов, требующих текущего отцепочного ремонта грузовых вагонов, ответственность за качество проведения текущего отцепочного ремонта грузовых вагонов, порядок отцепки и прицепки груженых или порожних грузовых вагонов в пути следования в целях проведения текущего отцепочного ремонта грузовых вагонов, сроки направления груженых или порожних грузовых вагонов на текущий отцепочный ремонт грузовых вагонов, а также порядок определения размера платы перевозчику и (или) владельцу инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования в связи с такими отцепкой и прицепкой в случае, если текущий отцепочный ремонт грузовых вагонов был проведен по причинам, не зависящим от перевозчика и (или) владельца инфраструктуры» (подготовлен Минтрансом России 10.10.2022 г.). URL: <https://regulation.gov.ru/projects?type=Grid#npa=131999> (дата обращения: 03.04.2023).

- ried out for reasons beyond control of the carrier and (or) the owner of the infrastructure» dated 26.01.2023 No. 2143-AKh/D 26i [Zaklyuchenie Ministerstva ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii ob otsenke reguliruyushchego vozdeystviya na proekt Prikaza Ministerstva transporta Rossiyskoy Federatsii «Ob utverzhenii Poryadka provedeniya tekushhego ottsepochnogo remonta gruzovykh vagonov, vkluchayushhego v sebya kriterii opredeleniya obespechennosti infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshhego pol'zovaniya punktami tekushhego ottsepochnogo remonta gruzovykh vagonov, perechen' neispravnostey gruzhenykh ili porozhnykh gruzovykh vagonov, trebuyushhikh tekushhego ottsepochnogo remonta gruzovykh vagonov, poryadok ottseпки i pritsepki gruzhenykh ili porozhnykh gruzovykh vagonov v puti sledovaniya v tselyakh provedeniya tekushhego ottsepochnogo remonta gruzovykh vagonov, sloki napravleniya gruzhenykh ili porozhnykh gruzovykh vagonov na tekushhiy ottsepochnyy remont gruzovykh vagonov, a takzhe poryadok opredeleniya razmera platy perevozhchiku i (ili) vladel'tsu infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshhego pol'zovaniya v svyazi s takimi ottsepkoy i pritsepkoj v sluchae, esli tekushhiy ottsepochnyy remont gruzovykh vagonov byl proveden po prichinam, ne zavislyashhim ot perevozhchika i (ili) vladel'tsa infrastruktury»]. URL: <http://ivo.garant.ru/#/basesearch/текущего%20отцепочного%20ремонта%20грузовых...%22%20%20от%2026.01.2023%20г.%20№%202143-АХ%7СД26и:0> (access date: 03.04.2023).
13. The statute of Railway Transport of the Russian Federation [Ustav zheleznodorozhnogo transporta Rossiyskoy Federatsii] : Federal Law No. 18-FL dated 10.01.2003 (as amended from 28.02.2023). URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_303491/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_303491/) (access date: 16.03.2023).
  14. Skorlygina N. The market has uncoupled from the current repairs [Rynok ottseplsya ot tekushhikh remontov]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4467808> (access date: 24.03.2021).
  15. Borisov D. Current uncoupling repairs: the strategy of the Ministry of Transport goes against practice and law [TOR: strategiya Mintransa idet vrazrez s praktikoy i pravom]. URL: <https://vgudok.com/lenta/tor-strategiya-mintransa-idyot-vrazrez-s-praktikoy-i-pravom-specvypuskvgudokcom-tor> (access date: 22.03.2021).
  16. The draft of the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation «On approval of the Procedure for carrying out the current uncoupling repair procedures of freight cars, which includes criteria for determining the availability of public railway transport infrastructure with points for the current uncoupling repair of freight cars, a list of malfunctions of loaded or empty freight cars requiring the current uncoupling repair of freight cars, responsibility for the quality of the current uncoupling repair of freight cars, the procedure for uncoupling and coupling loaded or empty freight cars en route in order to carry out the current uncoupling repair of freight cars, the timing of the direction of loaded or empty freight cars for the current uncoupling repair of freight cars, as well as the procedure for determining the amount of payment to the carrier and (or) the owner of the infrastructure of public railway transport in connection with such uncoupling and coupling in case if the current uncoupling repair of freight cars was carried out for the following reasons, independent of the carrier and (or) the owner of the infrastructure» (prepared by the Ministry of Transport of Russian Federation on 10.10.2022) [Proekt Prikaza Ministerstva transporta Rossiyskoy Federatsii «Ob utverzhenii Poryadka provedeniya tekushhego ottsepochnogo remonta gruzovykh vagonov, vkluchayushhego v sebya kriterii opredeleniya obespechennosti infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshhego pol'zovaniya punktami tekushhego ottsepochnogo remonta gruzovykh vagonov, perechen' neispravnostey gruzhenykh ili porozhnykh gruzovykh vagonov, trebuyushhikh tekushhego ottsepochnogo remonta gruzovykh vagonov, otvetstvennost' za kachestvo provedeniya tekushhego ottsepochnogo remonta gruzovykh vagonov, poryadok ottseпки i pritsepki gruzhenykh ili porozhnykh gruzovykh vagonov v puti sledovaniya v tselyakh provedeniya tekushhego ottsepochnogo remonta gruzovykh vagonov, sloki napravleniya gruzhenykh ili porozhnykh gruzovykh vagonov na tekushhiy ottsepochnyy remont gruzovykh vagonov, a takzhe poryadok opredeleniya razmera platy perevozhchiku i (ili) vladel'tsu infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshhego pol'zovaniya v svyazi s takimi ottsepkoy i pritsepkoj v sluchae, esli tekushhiy ottsepochnyy remont gruzovykh vagonov byl proveden po prichinam, ne zavislyashhim ot perevozhchika i (ili) vladel'tsa infrastruktury»]. URL: <https://regulation.gov.ru/projects?type=Grid#npa=131999> (access date: 03.04.2023).

УДК 629.4.014.7

**Олег Вячеславович Черепов**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны»  
 Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,  
**Марина Александровна Звягина**, студентка группы ПСгв-419  
 Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,  
**Василий Федорович Лапшин**, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны»  
 Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ИННОВАЦИОННЫХ ВАГОНОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

**Oleg Vyacheslavovich Cherepov**, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Cars Department,  
 Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,  
**Marina Alexandrovna Zvyagina**, student, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,  
**Vasily Fedorovich Lapshin**, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department,  
 Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Damage rate of innovative railcars used for transportation of mineral fertilizers

#### Аннотация

В рамках исследования выполнен анализ технического состояния инновационных вагонов (постройки с 2018 по 2022 г.), применяемых для перевозки минеральных удобрений, в сравнении с вагонами-минераловозами на тележках с осевой нагрузкой 23,5 т/ось. При оценке повреждаемости за основу принято количество отцепок вагонов в текущие виды ремонтов за межремонтный период.

Показано, что в среднем каждый типовой вагон ежегодно отцеплялся 0,92 раза, в то время как инновационный минераловоз — 0,42 раза. Значительная доля отцепок инновационных вагонов в текущий ремонт ТР-2 (74 %) производится по неисправности колесных пар (тонкий гребень), что на 42 % выше этого же показателя у типовых вагонов. Отмечено, что существующая упрощенная система учета по пробегу и сроку эксплуатации не позволяет выявить причинно-следственную связь возникновения неисправностей. Предложено для внутренних поверхностей кузова вагона разработать ремонтную технологию восстановления защитных покрытий.

**Ключевые слова:** инновационный вагон, минеральные удобрения, неисправность, повреждение, текущий ремонт, удельная повреждаемость, защитное покрытие.

#### Abstract

As part of the research, the technical condition of innovative railcars (built from 2018 to 2022) used for transportation of mineral fertilizers was analyzed in comparison with mineral railway cars on bogies with an axial load of 23.5 tons/axle. When assessing damage, the number of uncoupling of railcars in the current types of repairs for the inter-repair period is taken as a basis.

It is demonstrated that, on average, each standard railway car was uncoupled 0.92 times annually, while the innovative mineral carrier was uncoupled 0.42 times. A significant proportion of the uncoupling of innovative railcars in the current repair of the TR-2 (74 %) is due to a malfunction of the wheelsets (thin rib), which is 42 % higher than the same indicator for standard railcars. It is noted that the existing simplified accounting system for mileage and operation life does not allow to identify the cause-and-effect relationship of the occurrence of malfunctions. It is proposed to develop a repair technology for restoring protective covering for the inner surfaces of a railcar body.

**Keywords:** innovative railcar, mineral fertilizers, malfunction, damage, maintenance, specific damage, protective covering.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-16-21

#### ВВЕДЕНИЕ

Стратегические приоритеты развития подвижного состава предусматривают увеличение межремонтных пробегов между плановыми видами ремонта и сокращение отцепок в текущий отцепочный ремонт. Существующие критерии инновационности вагонов, наряду с увеличенной грузоподъемностью и нагрузкой на ось (до 25 т/ось), устанавливают пробег от постройки и капитального ремонта до деповского ремонта не менее 500 тыс. км (не менее 6 лет) [1].

Опыт эксплуатации вагонов с осевой нагрузкой 25 т/ось показал, что мнения об эффективности инновационных вагонов весьма неоднозначны [2, 3]. По данным Первой Грузовой Компании [3], средневзвешенные затраты на 16 лет эксплуатации инновационных вагонов на 31,4 % выше, чем типовых вагонов. С учетом сложившейся ситуации «намечено сформировать дополнительные требования к инновационным вагонам, в том числе по критериям их надежности в эксплуатации» [4].

Доля инновационных грузовых вагонов к середине 2022 г. составила более 17 % (224 тыс. вагонов), и в основном это полувагоны [5]. Второе место в парке инновационных вагонов занимают хoppers (для пере-



возки минеральных удобрений, зерна, цемента). Но если вопросы эффективности и сохранности инновационных полувагонов достаточно широко освещены [2, 3], то для других типов вагонов эта проблема практически не рассмотрена. Ежегодный рост объемов перевозок химических и минеральных удобрений способствовал обновлению парка вагонов-минераловозов, включая производство инновационных моделей. На начало 2021 г. в собственности предприятий — членов Российской ассоциации производителей удобрений (РАПУ) находилось свыше 20 тыс. вагонов [6]. События 2022 г. коренным образом изменили приоритеты выпуска подвижного состава: в сегменте хопперов, в первую очередь минераловозов, на фоне резкого падения производства всех типов вагонов произошел рост на 70 % [7].

Учитывая возросшую потребность в вагонах для перевозки минеральных удобрений и наметившуюся тенденцию по разработке дополнительных требований к инновационным вагонам, авторы представленного в статье исследования проанализировали техническое состояние и оценили повреждаемость инновационных вагонов-минераловозов.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА СБОРА ИНФОРМАЦИИ

Содержание термина «повреждаемость» для подвижного состава не закреплено в нормативных документах и чаще всего используется при анализе технического состояния вагонов на путях необщего пользования. В статье под повреждаемостью понимается количество неисправностей вагона независимо от причины их возникновения (технологические, эксплуатационные повреждения) [8], но служащих основанием для отцепки вагона в текущие виды ремонта ТР-1 и ТР-2 за определенный период времени (в данном случае — за межремонтный период). К числу показателей надежности, которые проявляются в процессе длительной эксплуатации, относится удельная повреждаемость. Авторами удельная повреждаемость определяется как число повреждений, приходящихся на количество единиц подвижного состава в выборочной совокупности.

В рамках исследования выполнен анализ технического состояния инновационных вагонов-минераловозов постройки

с 2018 по 2022 г. в сравнении с вагонами на тележках с осевой нагрузкой 23,5 т/ось (типовых). В выборочную совокупность (табл. 1) включены вагоны типовых моделей 19-9950 (АО «Барнаульский вагоноремонтный завод»), 19-9814, 19-1274 (АО «Рузхиммаш») и инновационной модели 19-9835-01 (АО «Тихвинский вагоностроительный завод»), находившиеся на станции погрузки с 1 по 29 июля 2022 г. Сбор данных о техническом состоянии вагонов осуществлялся с помощью автоматизированной системы управления пунктом технического обслуживания (АСУ ПТО).

Все вагоны в выборочной совокупности представляют собой крытый хоппер с ручным приводом механизма разгрузки в межрельсовое пространство. Значительные преимущества модели 19-9835-01 — повышенная осевая нагрузка (до 25 т/ось) и увеличенный срок межремонтных пробегов, который обеспечивает снижение стоимости жизненного цикла вагона. Согласно заявленному производителем преимуществам инновационных вагонов, «улучшенная динамика в совокупности с использованием колес повышенной твердости и специальных тормозных колодок снижает скорость износа и темп развития выщербин колес, что увеличивает срок их эксплуатации до 12 лет» [9].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показывает практика, основная доля отказов универсальных грузовых вагонов современного парка связана с неисправностями колесных пар и нарушением требований ГОСТ 22235–2010 в процессе погрузочно-разгрузочных операций [5, 10]. В общей сложности повреждаемость инновационных универсальных полувагонов на 30 % выше, чем типовых моделей [11]. В этом плане показатели надежности специализированных вагонов для перевозки минеральных удобрений имеют существенно лучшие значения (табл. 2). Количество отцепок в текущий ремонт у инновационных моделей на 36 % меньше при значительно большем сроке эксплуатации (на 28 %). В среднем каждый типовой вагон ежегодно отцеплялся 0,92 раза, в то время как инновационный минераловоз — 0,42 раза. Максимальное число отцепок в текущий ремонт за срок эксплуатации как у инновационных, так и у типовых минераловозов равно 6.

Таблица 1

Характеристика выборочной совокупности вагонов, используемых для перевозки минеральных удобрений\*

Модель вагона	Завод-изготовитель	Пробег и срок от постройки до деповского ремонта		Материал кузова	Год постройки	Назначенный срок службы, лет	Число вагонов в выборочной совокупности	Наличие внутреннего покрытия
		тыс. км	лет					
19-9835-01	АО «Тихвинский вагоностроительный завод»	1000	8	09Г2С, 09Г2Д, 09Г2, 09Г2СД-12	2018–2020	32	50	Да
19-9950	АО «Барнаульский вагоноремонтный завод»	210	3	09Г2С, 09Г2Д, 09Г2, 09Г2СД-12	2018–2019	30	20	Н/д
19-9814	ОАО «Рузхиммаш»	210 (160)	3(2)	10ХНДП, 10ХСНД-3	2018–2020	30	29	Н/д
19-1274	ОАО «Рузхиммаш»	210	3 (2)	09Г2С, 09Г2Д, 09Г2, 09Г2СД-12	2021	26	2	Да

\*Данные из открытых источников.

Таблица 2

Характеристика эксплуатационной работы вагонов-минераловозов выборочной совокупности

Вагон	Срок эксплуатации, лет	Число отцепок в текущий ремонт на 1 вагон (среднее значение по выборочной совокупности) за срок эксплуатации			Число вагонов, не имеющих отцепок в ТР	Максимальное число отцепок в ТР за срок эксплуатации	Число претензий к качеству изготовления/ремонта
		всего	ТР-1	ТР-2			
Типовой	2,37	2,2	0,9	1,3	4	6	8/1
Инновационный	3,32	1,4	0,3	1,1	8	6	5/0

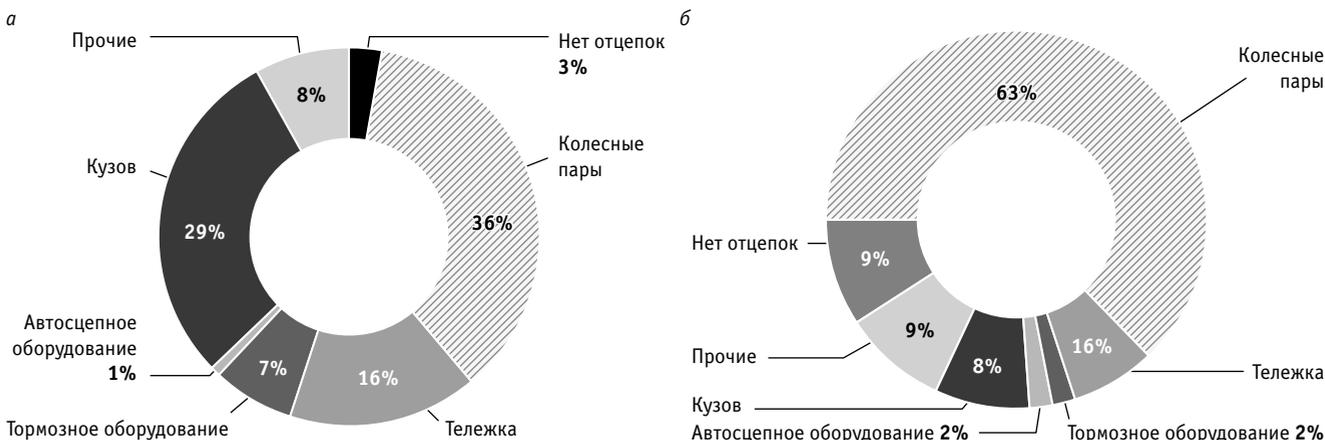


Рис. 1. Распределение отцепок типовых (а) и инновационных (б) вагонов в текущий ремонт по неисправностям основных узлов

На рис. 1 показано распределение отцепок вагонов в текущий ремонт по неисправностям основных узлов. В целом структура и характер неисправностей поступающих в текущий ремонт минераловозов соответствует общей картине отцепок вагонов на железных дорогах Российской Федерации. Как правило, доля отцепок инновационных минераловозов в текущий отцепочный ремонт связана с неисправностями колесных пар — 63 %, кузова — 8 % и тележек — 7 %. У типовых вагонов — соответственно 36, 29 и 16 %.

Основная доля отцепок инновационных вагонов в текущий ремонт ТР-2 (с отцепкой от состава поезда) связана с неисправностями колесных пар (рис. 2): тонкий гребень — 74 %, выщербины обода колеса — 22 %, неравномерный прокат по кругу катания — 3 %. В то же время у типовых вагонов отцепки по тонкому гребню не превышают 32 %, по выщербинам обода колеса — 44 %. В отношении инновационных вагонов-минераловозов это крайне негативный результат, поскольку ресурс колеса зависит не только от естественного износа, но и от величины снимаемого металла по ободу при восстановлении профиля катания колеса обточкой.

В работе [12] показано, что количество обточек колеса по тонкому гребню в зависимости от его толщины до и после восстановления профиля увеличилось в 2–6 раз. В этом случае ресурс колеса может составлять от 335 до 542 тыс. км. Дать более точную оценку не представляется возможным, так как существующая система учета по пробегу и календарному сроку не отражает технологию эксплуатационной работы вагонов

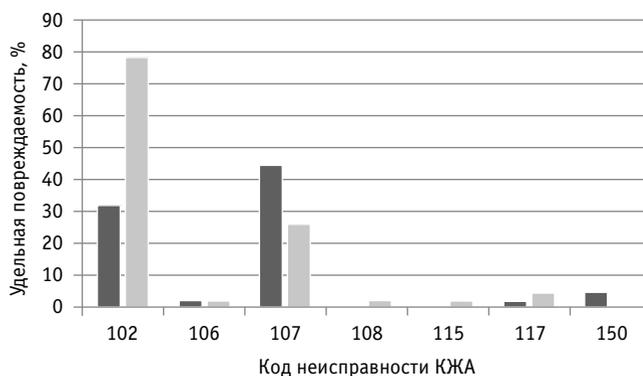


Рис. 2. Удельная повреждаемость вагонов, отцепленных в ТР-2, по кодам неисправностей: ■ — типовые вагоны; ■ — инновационные вагоны

(работа на маршрутах, количество сортировочных горок и т.д.) и не позволяет установить причинно-следственную связь возникновения неисправностей.

Основная конструктивная особенность инновационных вагонов — оборудование ходовых частей буксовыми кассетными узлами. В этом плане такое конструктивное решение полностью себя оправдывает: отцепки инновационных вагонов по неисправностям буксового узла отсутствуют, в то время как у типовых вагонов более 4 % отцепок в ТР-2 приходится на гребень букс по внешним признакам.

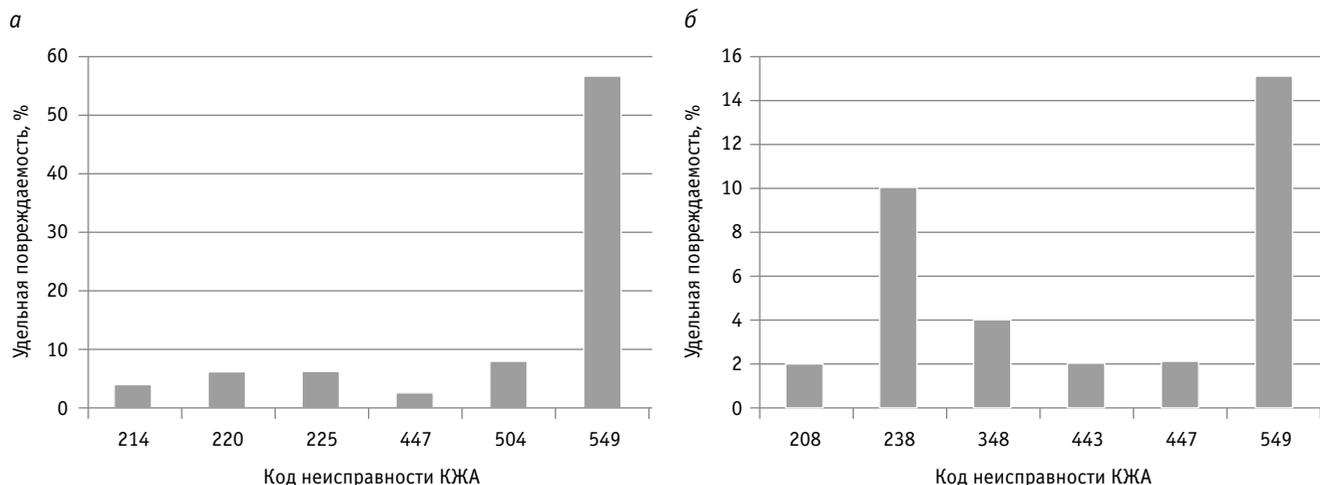


Рис. 3. Удельная повреждаемость типовых (а) и инновационных (б) вагонов, отцепленных в ТР-1, по кодам неисправностей

У вагонов, отцепленных в ТР-1 (при подготовке к перевозкам), наибольшие значения удельной повреждаемости соответствуют коду неисправности КЖА 549 — 56 и 14 % у типовых и инновационных моделей соответственно (рис. 3). Однако в данном случае, на наш взгляд, показатели повреждаемости не отражают реальной картины, что обусловлено заменой кода неисправности 549 на 360 (по согласованию сторон перевозочного процесса) при вводе в информационные системы. Среди прочих неисправностей инновационных вагонов с удельной повреждаемостью 10 % отметим наличие зазоров между колпаком и ответной частью скользуна (код КЖА 238) и два случая отцепки по неисправности поглощающего аппарата (код КЖА 348). У типовых вагонов модели 19-9950 постройки Барнаульского вагоноремонтного завода 8 % отцепок выполнялось по такой неисправности, как обрыв сварного шва раскосов (код КЖА 504).

Анализ причин возникновения неисправностей по классификации КЖА [8] показал, что у вагонов-минераловозов (табл. 3) в отличие от универсального подвижного состава (полувагонов) преобладают неисправности технологического и эксплуатационного характера.

Если у типовых минераловозов распределение причин возникновения неисправностей вполне закономерное, то у инновационных моделей 84,2 % составляют неисправности, вызванные естественным износом деталей и узлов вагона в процессе эксплуатации. Как было отмечено ранее, основная доля отцепок инновационных вагонов в текущий ремонт ТР-2 связана с неисправностями колесных пар (тонкий гребень и выщербины обода колеса).

Следует обратить внимание еще на одну особенность инновационных вагонов-минераловозов, входящих в выборочную совокупность, — это наличие защитных покрытий внутренних и наружных поверхностей от коррозионного воздействия перевозимого груза. Тем не менее конструкторская и эксплуатационная документация (в большей степени для внутренних поверхностей кузова) не содержит практических рекомендаций по восстановлению защитных покрытий.

Таблица 3

Распределение причин возникновения неисправностей, %

Тип вагона	Причина возникновения неисправностей		
	Технологическая <sup>1</sup>	Эксплуатационная <sup>2</sup>	Повреждение <sup>3</sup>
Инновационный	14,6	84,2	1,2
Типовой	43,9	40,6	15,5

Примечания: 1. Неисправность, связанная с качеством изготовления и выполнения плановых и внеплановых ремонтов грузовых вагонов, а также с качеством подготовки вагонов к перевозкам. 2. Неисправность, вызванная естественным износом деталей и узлов вагона в процессе эксплуатации. 3. Неисправность, вызванная нарушением установленных правил и условий эксплуатации вагона при маневровых и погрузочно-разгрузочных операциях на путях промышленных предприятий и путях общего пользования.

Опыт эксплуатации вагонов для перевозки минеральных удобрений и проведенные ранее исследования свидетельствуют о том, что одна из причин снижения несущей способности кузовов — коррозия металла [13, 14]. Например, при перевозке хлористого калия в металлоконструкции вагона-минераловоза из стали марок 09Г2 (элементы крыши, разгрузочных бункеров и люков) скорость коррозии составляет 0,11–0,14 мм в год. Изменение свойств защитных покрытий в результате химической активности перевозимых грузов, уменьшение толщины покрытий, повреждения, возникающие при зачистке от остатков грузов, приводят к очаговой коррозии металла и, как следствие, к увеличению стоимости жизненного цикла вагона.

При заявленном нормативном межремонтном сроке 8 лет [15] коррозионные процессы нивелируют преимущества инновационных вагонов. Поэтому для таких вагонов целесообразно разработать предлагаемую С. Л. Жулиным в [16] так называемую ремонтную технологию восстановления защитных покрытий, учитывающую характер и степень их разрушения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты носят первое оценочное суждение о надежности инновационных вагонов-минераловозов в эксплуатации по данным информационных систем. Из-за отсутствия в печати данных о структуре и характере неисправностей инновационных специализированных вагонов в эксплуатации (в отличие от универсальных полувагонов) материал

статьи может послужить основой для понимания особенностей эксплуатации и учета работы (в том числе в действующих информационных системах) подвижного состава, применяемого при перевозке минеральных удобрений.

Для повышения достоверности полученных оценок целесообразно провести повторный эксперимент с увеличенным числом объектов в выборочной совокупности.

## Литература

1. СТО РЖД 10.002–2015. Вагоны грузовые инновационные. Правила оценки экономической эффективности : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 26.04.2016 г. № 768р.
2. Калетин С. В. PRO инновационный вагон. URL: <http://railwayexpo.ru/ru/component/content/article?id=179:materialy-konferentsii&Itemid=141> (дата обращения: 12.10.2021).
3. Лосев Д. Н. Эксплуатация вагонов нового поколения и затраты на их содержание. URL: <http://railwayexpo.ru/ru/component/content/article?id=179:materialy-konferentsii&Itemid=141> (дата обращения: 12.10.2021).
4. Каким должен быть инновационный вагон? URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/kakim-dolzhen-byt-innovatsionnyy-vagon/> (дата обращения: 26.08.2022).
5. Инновационные вагоны рынку не нужны? URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/innovatsionnye-vagony-rynku-ne-nuzhny/> (дата обращения: 01.09.2022).
6. Перевозки удобрений: пройти по тарифному лезвию. РЖД и химические компании в поиске баланса интересов. URL: <https://vgudok.com/lenta/perevozki-udobreniy-proyti-po-tarifnomu-lezviyu-rzhd-i-himicheskie-kompanii-v-poiske-balansa> (дата обращения: 04.03.2022).
7. С начала года общий парк грузовых вагонов РФ вырос на 27,9 тыс. ед. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/s-nachala-goda-obshchiy-park-gruzovykh-vagonov-rf-vyros-na-27-9-tys-ed/> (дата обращения: 12.12.2022).
8. Классификатор. Основные неисправности грузовых вагонов (КЖА 2005 04) : утв. комиссией Совета по железнодорожному транспорту полномочных представителей вагонного хозяйства железнодорожных администраций, протокол от 23–25 марта 2004 г.
9. Объединенная вагонная компания. Инновационная ходовая часть. URL: [https://www.uniwagon.com/products/bogies/18-9855\\_18-6863/](https://www.uniwagon.com/products/bogies/18-9855_18-6863/) (дата обращения: 12.11.2022).
10. Свердлов В. Б., Лапшин В. Ф. Обеспечение сохранности вагонного парка на путях необщего пользования // Транспорт Урала. 2021. № 4 (71). С. 33–39. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-33-39. ISSN 1815–9400.
11. Звягина М. А., Лапшин В. Ф. Анализ технического состояния инновационных грузовых вагонов // Инновационный транспорт. 2023. № 1 (47). С. 64–68. DOI: 10.20291/2311-164X-2023-1-64-68. ISSN 2311–164X.
12. Гайипов А. Б., Наркизова Е. А., Белгородцева Т. М. Разработка уточненной методики расчета баланса колесных пар и оценка потребности в колесах и осях для вагонного парка Республики Узбекистан // Известия ПГУПС. 2021. № 3. С. 319–334. ISSN 1815–588X.

## References

1. STO RZD 10.002–2015. Innovative freight cars. Rules for assessing economic efficiency [STO RZhd 10.002–2015. Vagonyi gruzovye innovatsionnye. Pravila otsenki ekonomicheskoy effektivnosti] : approved by the Order of the JSC «RZD» dated 26.04.2016 No. 768r.
2. Kaletin S. V. PRO innovative railcar [PRO innovatsionnyy vagon]. URL: <http://railwayexpo.ru/ru/component/content/article?id=179:materialy-konferentsii&Itemid=141> (access date: 12.10.2021).
3. Losev D. N. Operation of new generation railcars and their maintenance expenses [Ekspluatatsiya vagonov novogo pokoleniya i zatraty na ikh sodержание]. URL: <http://railwayexpo.ru/ru/component/content/article?id=179:materialy-konferentsii&Itemid=141> (access date: 12.10.2021).
4. What should an innovative railcar be like? [Kakim dolzhen byt' innovatsionnyy vagon?]. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/kakim-dolzhen-byt-innovatsionnyy-vagon/> (access date: 26.08.2022).
5. The market does not need innovative railcars, does it? [Innovatsionnye vagonyi rynku ne nuzhny?]. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/innovatsionnye-vagonyi-rynku-ne-nuzhny/> (access date: 01.09.2022).
6. Transportation of fertilizers: go through the tariff blade. Russian Railways and chemical companies in search of a balance of interests [Perevozki udobreniy: proyti po tarifnomu lezviyu. RZhd i khimicheskie kompanii v poiske balansa interesov]. URL: <https://vgudok.com/lenta/perevozki-udobreniy-proyti-po-tarifnomu-lezviyu-rzhd-i-himicheskie-kompanii-v-poiske-balansa> (access date: 04.03.2022).
7. Since the beginning of the year, the overall fleet of freight cars of the Russian Federation has grown by 27.9 thousand units [S nachala goda obshchiy park gruzovykh vagonov RF vyros na 27,9 tys. ed.]. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/s-nachala-goda-obshchiy-park-gruzovykh-vagonov-rf-vyros-na-27-9-tys-ed/> (access date: 12.12.2022).
8. Classifier. The main malfunctions of freight railcars (CRWA 2005 04) [Klassifikator. Osnovnye neispravnosti gruzovykh vagonov (KZhA 2005 04)] : approved by the Commission of the Council for Railway Transport of Authorized Representatives of the Railway Carriage Economy of Railway Administrations, protocol of March 23–25, 2004.
9. United Wagon Company. Innovative undercarriage [Ob'edinennaya vagonnaya kompaniya. Innovatsionnaya khodovaya chast']. URL: [https://www.uniwagon.com/products/bogies/18-9855\\_18-6863/](https://www.uniwagon.com/products/bogies/18-9855_18-6863/) (access date: 12.11.2022).
10. Sverdlov V. B., Lapshin V. F. Car fleet safety assurance on non-public railway tracks [Obespechenie sokhrannosti vagonnogo parka na putyakh neobshchego pol'zovaniya] // Transport of the Urals. 2021. No. 4 (71). Pp. 33–39. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-4-33-39. ISSN 1815–9400.
11. Zvyagina M. A., Lapshin V. F. Analysis of the technical condition of innovative freight rail cars [Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya innovatsionnykh gruzovykh vagonov] // Innotrans. 2023. No. 1 (47). Pp. 64–68. DOI: 10.20291/2311-164X-2023-1-64-68. ISSN 2311–164X.
12. Gayipov A. B., Narkizova E. A., Belgorodtseva T. M. Development of a refined methodology for calculating the balance of wheelsets and assessment of the need for wheels and axles for the wagon fleet of the Republic of Uzbekistan [Razrabotka utochnennoy metodiki rascheta balansa kolesnykh par i otsenka potrebnosti v kolesakh i osyakh dlya vagonno-



13. Лапшин В. Ф., Буткин М. Г. Прогнозирование долговечности противокоррозионных покрытий // Железнодорожный транспорт. 2003. № 1. С. 48–49. ISSN 0044–4448.
14. Лапшин В. Ф. Повышение эксплуатационной надежности вагонов-минераловозов // Железнодорожный транспорт. 2002. № 1. С. 26–30. ISSN 0044–4448.
15. Минераловоз, модель 19-9835-01. URL: [https://www.uniwagon.com/products/hopper\\_cars\\_for\\_transportation\\_of\\_mineral\\_fertilizers/hopper\\_car\\_for\\_transportation\\_of\\_mineral\\_fertilizers\\_model\\_19-9835-01/](https://www.uniwagon.com/products/hopper_cars_for_transportation_of_mineral_fertilizers/hopper_car_for_transportation_of_mineral_fertilizers_model_19-9835-01/) (дата обращения: 19.08.2022).
16. Лапшин В. Ф., Жулин С. Л., Буткин М. Г. Вагоны-минераловозы — условия эксплуатации и защита от коррозии // Очистка. Окраска. 2007. № 2. С. 26–27.

13. Lapshin V. F., Butkin M. G. Forecasting the durability of anticorrosive coatings [Prognozirovanie dolgovechnosti protivokorroziionnykh pokrytiy] // Railway Transport. 2003. No. 1. Pp. 48–49. ISSN 0044–4448.
14. Lapshin V. F. Improving the operational reliability of mineral wagons [Povyshenie ekspluatatsionnoy nadezhnosti vagonov-mineralovozov] // Railway Transport. 2002. No. 1. Pp. 26–30. ISSN 0044–4448.
15. Mineral carrier, model 19-9835-01 [Mineralovoz, model' 19-9835-01]. URL: [https://www.uniwagon.com/products/hopper\\_cars\\_for\\_transportation\\_of\\_mineral\\_fertilizers/hopper\\_car\\_for\\_transportation\\_of\\_mineral\\_fertilizers\\_model\\_19-9835-01/](https://www.uniwagon.com/products/hopper_cars_for_transportation_of_mineral_fertilizers/hopper_car_for_transportation_of_mineral_fertilizers_model_19-9835-01/) (access date: 19.08.2022).
16. Lapshin V. F., Zhulin S. L., Butkin M. G. Mineral wagons — operating conditions and corrosion protection [Vagony-mineralovozy — usloviya ekspluatatsii i zashhita ot korrozii] // Cleaning. Paintwork 2007. No. 2. Pp. 26–27.

Объем статьи 0,67 авторских листа

УДК 629.4.027.2:629.4.027.3:629.3.027.3

Сергей Викторович Павлов, генеральный директор ООО «ПетроРемСтрой» (ООО «ПРС»), Санкт-Петербург, Россия,  
 Александр Георгиевич Семенов, кандидат технических наук, доцент Высшей школы транспорта  
 Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ),  
 руководитель Научно-технического отдела ООО «ПетроРемСтрой» (ООО «ПРС»), Санкт-Петербург, Россия

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОДЕРНИЗАЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО СТАБИЛИЗАТОРОВ ПОПЕРЕЧНОГО НАКЛОНА ВАГОНОВ ДЛЯ СКОРОСТНОГО ДВУХЭТАЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Sergey Viktorovich Pavlov, General Manager, «PetroRemStroy» LLC («PRS» LLC), St. Petersburg, Russia,  
 Alexander Georgievich Semenov, PhD in Engineering, Associate Professor, Higher School of Transport,  
 Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Head of the Scientific and Technical Department,  
 «PetroRemStroy» LLC («PRS» LLC), St. Petersburg, Russia

### Design, modernization and production of lateral tilt stabilizers for high-speed double-deck rolling stock

#### Аннотация

Статья посвящена вопросам организации серийного производства торсионных стабилизаторов поперечного наклона кузовов вагонов. Актуальность темы обусловлена обновлением российского парка железнодорожного подвижного состава скоростными пассажирскими поездами с двухэтажными вагонами повышенной комфортности, а также необходимостью импортозамещения. Все разработки, представленные в статье, защищены патентами на изобретения, полезные модели и промышленные образцы, что свидетельствует не только об их высоком научно-техническом уровне, но и о большом практическом и теоретико-методическом значении.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, стабилизация поперечного наклона кузова вагона, торсионный стабилизатор, торсионный узел, тяга.

#### Abstract

The article is devoted to the organization of serial production of lateral tilt torsion stabilizers of railcar bodies. The relevance of the topic is due to upgrade of the Russian fleet of railway rolling stock by high-speed passenger trains with double-decker railcars of enhanced comfort, as well as the necessity of import substitution. All the developments presented in the article are protected by invention patents, useful models and industrial samples, which indicates not only their high scientific and technical level, but also their great practical, theoretical and methodological significance.

**Keywords:** railway transport, stabilization of railcar body lateral tilt, torsion stabilizer, torsion unit, traction.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-22-26

#### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в сфере наземного рельсового транспорта, в частности подвижного состава, происходят качественные научно-технические изменения. В соответствии с этими изменениями петербургское машиностроительное предприятие ООО «ПетроРемСтрой» (ПРС) активно занимается разработкой и серийным изготовлением (при научно-исследовательском сопровождении) механических систем пассажирских вагонов локомотивной тяги (проекты 101 и 2002), моторвагонного подвижного состава (проект 102), тележек рельсового автобуса на водородных топливных элементах (рельсового автобуса с электрической передачей — проект 103), скоростного электропоезда повышенной комфортности (проект 106) и др. К числу основных объектов исследования и промышленного производства относятся в том числе торсионные стабилизаторы поперечного наклона кузова вагона. Причем в процессе организации их серийного производства возникает необходимость решать две проблемы.

Первая проблема заключается в следующем. Современная мировая тенденция повышения скорости подвижного состава до 140–160 км/ч и более в со-

четании с вводом в эксплуатацию двухэтажных пассажирских вагонов, повышением комфортности перевозок (в том числе плавности хода), увеличением надежности и срока службы подвижного состава вступили в диалектическое противоречие с морально устаревающим в этих условиях устройством бортовых систем. Например, вагон с более высоким расположением центра масс (а двухэтажный вагон именно такой) и на более высоких скоростях, естественно, больше подвержен боковой неустойчивости на поворотах рельсового пути (вплоть до опрокидывания).

Вторая проблема связана с острой актуальностью в импортозамещении, поскольку до введения антироссийских экономических санкций стабилизаторы и сферические подшипники поставлялись в нашу страну из Германии [1–3].

#### СТАБИЛИЗАТОРЫ ПОПЕРЕЧНОГО НАКЛОНА ВАГОНОВ ДЛЯ СКОРОСТНОГО ДВУХЭТАЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Укрупненно в состав стабилизатора поперечного наклона кузова вагона входят торсионный вал, опоры торсионного вала с подшипниковыми узлами, рычаги, тяги, комплект крепежных деталей.

Перед разработчиками стабилизатора поперечного наклона кузова вагона был поставлен комплекс задач. В частности: стабилизатор при проведении стендовых испытаний должен выдерживать 1 млн циклов нагружений при максимальной нагрузке (максимальная рабочая нагрузка на один рычаг — 45,7 кН, максимальный рабочий момент на валу — 8 кН·м, предельно допустимая кратковременная нагрузка на один рычаг в аварийной ситуации — 57,1 кН) и максимальном угле закручивания вала (максимальный рабочий угол закручивания вала — 16°, предельно допустимый кратковременный угол закручивания вала в аварийной ситуации — 20°);

угол бокового наклона тяг в обоих направлениях при любом угле их поворота — не более 11°;

возможность регулировки длины тяг на 15 мм на удлинение и укорочение от номинального размера по центрам головок 499 мм;

наличие на валу защитного кожуха; наличие мест для крепления страховочных элементов, предотвращающих падение элементов стабилизатора на путь;

возможность следования в пределах одного маршрута через разные климатические зоны в условиях изменения температуры окружающего воздуха на 20 °С в течение 1 ч;

соответствие группе механического исполнения М26 по ГОСТ 30631;

средняя наработка на отказ стабилизатора не менее 1,2 млн км пробега;

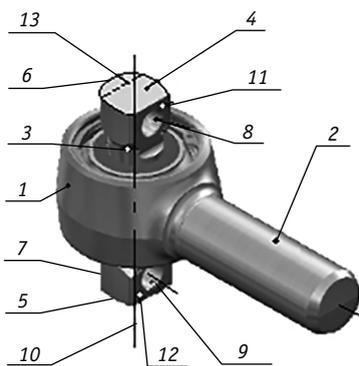
назначенный срок службы стабилизатора с проведением регламентных работ не менее 10 лет.

Среди важнейших технических новшеств [4–18], внесенных в серийную продукцию, следует отметить:

применение отечественных шаровых (сферических) шарниров (ШШ) в опорах торсионного вала [5, 14], что позволило компенсировать ряд перекосов и деформаций, отказаться от экспортной зависимости (рис. 1, 2);

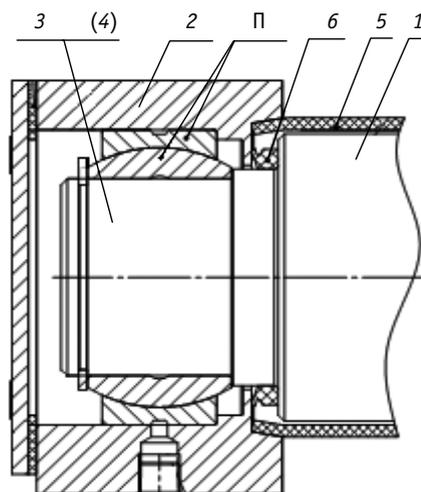
введение и оптимизация упругих устройств-компенсаторов («ограничителей») сложных циклических перекосов в наконечниках тяг (рис. 3, [10, 12]);

конструктивное обеспечение снижения циклического силового воздействия на резьбовые соединения талрепов



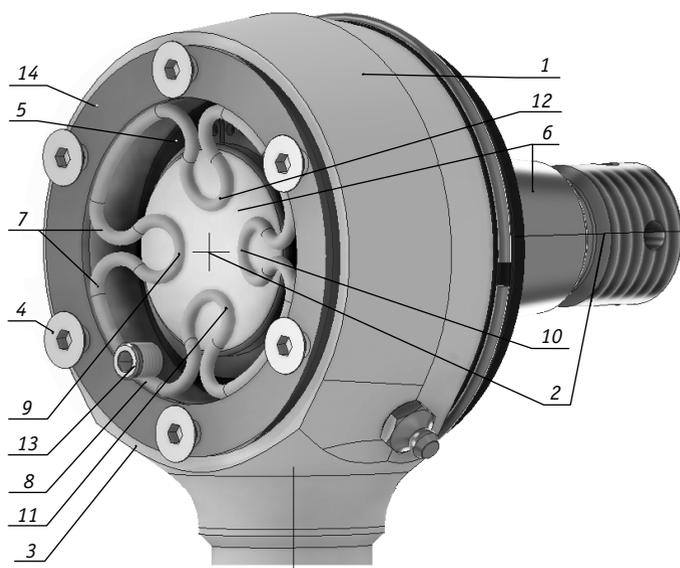
**Рис. 1. Шаровой шарнир (сферический подшипник) с опозитным шаровым пальцем (общий вид) [7, 8]:**

1 — корпус ШШ; 2 — элемент крепления корпуса (ножка, палец корпуса); 3 — шаровой палец (шаровая ось); 4 и 5 — концевые (посадочные) участки крепления шарового пальца (шаровой оси); 6 и 7 — посадочные поверхности элементов 4 и 5 соответственно; 8 и 9 — сквозные отверстия в концевых элементах 4 и 5 соответственно под болты (винты); 10 — продольная ось шарового пальца (шаровой оси); 11 и 12 — односторонние лыски под головки болтов на концевых элементах шарового пальца (шаровой оси); 13 — условная лыска с плоской поверхностью



**Рис. 2. Подшипниковая опора торсионного вала [14]:**

П — подшипник радиальный сферический; 1 — торсионный вал; 2 — корпус опоры; 3(4) — цилиндрические концы вала; 5 — защитный кожух вала; 6 — торцевое уплотнение



**Рис. 3. Конструкция упругого компенсатора перекосов в стабилизаторе (общий вид) [10, 12]:**

1 — корпус наконечника тяги; 2 — продольная ось (ось симметрии) наконечника в целом, подшипника и ограничителя; 3 — фланец корпуса наконечника; 4 — винты крепления крышки фланца корпуса; 5 — сферическое тело трения в составе сферического подшипника; 6 — палец или ось (телесная) в составе сферического подшипника; 7 — ограничитель (распорная пружина сжатия); 8 — кусочно-кольцевое основание (кольцо основания) ограничителя; 9 и 10 — пара упорных концевых ножек ограничителя; 11 и 12 — вторая (дополнительная) пара упорных концевых ножек ограничителя; 13 — коническая смазочная (заправочная) пробка в крышке фланца корпуса; 14 — упругая (например, резиновая) дисковая уплотнительная прокладка под крышку фланца корпуса

тяг [6], что напрямую влияет на работоспособность и долговечность стабилизатора;

существенное повышение компактности взаимосвязи рычагов с тягами [8, 11], что расширило возможности компоновки стабилизатора на вагоне и сняло часть проблем адаптации конструкции к базовым рамным конструкциям и кузову вагонов (рис. 4);

расширение унификации (шарниры, тяги и поводки [9]), что удешевило продукцию и снизило организационную нагрузку не только на производственном, но и на эксплуатационном этапе;

организация уплотнений ШШ и обеспечение их фиксации [4, 12, 16].

Патентными исследованиями подтверждена патентная чистота поставленной на производство продукции. Оригинальные технические и дизайнерские (конструкторско-художественные) решения защищены патентами Российской Федерации на изобретения, полезные модели и промышленные образцы [4–18], что свидетельствует о мировом уровне их новизны, изобретательском уровне и промышленной применимости.

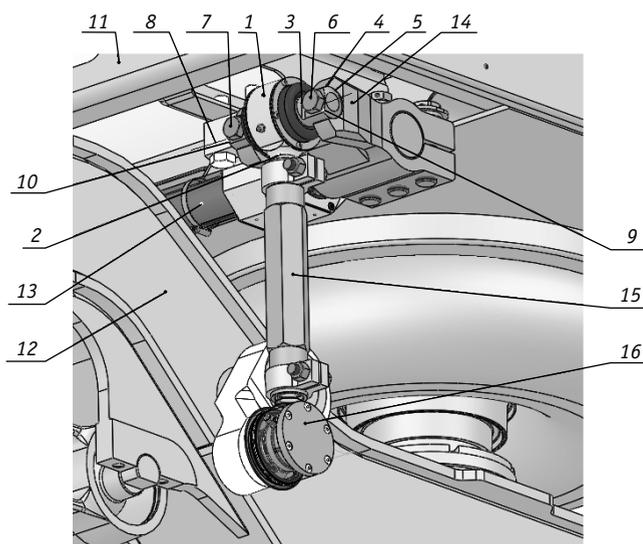
Эмпирические данные, полученные в результате стендовых и натурных испытаний (главным образом на Тверском вагоностроительном заводе), подтвердили работоспособность, надежность, долговечность и безопасность торсионных стабилизаторов производства ООО «ПРС».

Говоря о значимости результатов опытно-конструкторских работ (включая результаты научно-технических исследований) [19–24], следует подчеркнуть, что область их применения не ограничивается модернизацией (обновлением) рельсового транспорта (подвижного состава): многое можно применить и на безрельсовом транспорте (например, на автомобильном).

Помимо этого, выполненные работы по исследованию, испытанию и проектированию стабилизаторов поперечного наклона кузовов вагонов имеют большое теоретико-методическое (научно- и учебно-методическое) значение.

## Выводы

1. В связи с созданием нового поколения пассажирского подвижного состава — скоростного (140–160 км/ч) с двухэтажными вагонами — проведены исследования, опытно-конструкторские работы и испытания по организации серийного производства отечественных стабилизаторов поперечного наклона кузовов вагонов.



**Рис. 4. Фрагмент 3D-изображения компьютерной модели установленного на железнодорожный вагон стабилизатора с показом шарнирного соединения рычага торсиона с тягой [8]:**

1 — корпус шарового шарнира (сферического подшипника); 2 — элемент крепления корпуса (ножка, палец корпуса); 3 — шаровой палец (шаровая ось); 4 — концевые (посадочные) участки (элементы) крепления шарового пальца (шаровой оси); 5 — посадочные поверхности элементов 4; 6 и 7 — болты (винты); 8 — продольная ось шарового пальца (шаровой оси); 9 и 10 — односторонние лыски под головки болтов на концевых элементах шарового пальца (шаровой оси); 11 — рама (балка рамы) кузова железнодорожного вагона (рама вагона); 12 — колесная тележка (одна из тележек) железнодорожного вагона; 13 — торсионный вал стабилизатора поперечной устойчивости кузова; 14 — рычаг (вилочного типа) стабилизатора; 15 — тяга стабилизатора; 16 — шарнир соединения тяги с колесной тележкой вагона

2. При этом фактически не только решена задача модернизации российского подвижного состава, но и проблема импортозамещения: организовано серийное производство (с поставками продукции) по проектам 101, 2002, 102, 106 и др.

3. Практически все новые технические и дизайнерские решения защищены в патентном плане.

4. Одними из важнейших направлений исследований и развития научно-производственного потенциала ООО «ПРС» в обозримой перспективе будут укрепление собственной испытательной базы, а также дальнейшая рационализация и оптимизация узлов подвижного состава и их компонентов.

## Литература

1. Heyd-Shop — Perlini. URL: <https://www.heyd-parts.de/shop/index.php?cat=c52> (дата обращения: 11.03.2022).
2. Auto-shimming und auto-levelling. URL: <https://www.hemscheidt.de/produkte-services/federn/> (дата обращения: 11.03.2022).
3. Solutions. URL: <https://www.ferrabyrne.co.uk/solutions> (дата обращения: 11.03.2022).
4. Наконечник тяги торсионного стабилизатора поперечной устойчивости кузова транспортного средства / Е. О. Белозерцев, С. В. Павлов : патент 2738872 Российская Федерация. № 2020125363/11; заявл. 22.07.2020; опубл. 17.12.2020, Бюл. № 35.
5. Торсионный узел стабилизатора бокового наклона кузова вагона / Е. О. Белозерцев, С. В. Павлов : патент 2743467 Российская Федерация. № 2020120370/11; заявл. 15.06.2020; опубл. 18.02.2021, Бюл. № 5.
6. Тяга торсионного стабилизатора вагона / Е. О. Белозерцев, С. В. Павлов : патент 2743601 Российская Федерация. № 2020119963/11; заявл. 09.06.2020; опубл. 20.02.2021, Бюл. № 5.
7. Шаровой шарнир / Е. О. Белозерцев, А. В. Лозин, С. В. Павлов : патент 2763301 Российская Федерация. № 2021126462; заявл. 07.09.2021; опубл. 28.12.2021, Бюл. № 1.
8. Стабилизатор поперечной устойчивости кузова железнодорожного вагона / Е. О. Белозерцев, А. В. Лозин, С. В. Павлов : патент 2770029 Российская Федерация. № 2021126829; заявл. 10.09.2021; опубл. 14.04.2022, Бюл. № 11.
9. Комплект из тяги торсионного стабилизатора поперечного наклона кузова вагона и поводка продольной взаимосвязи рамы и колесной тележки вагона / С. В. Павлов, А. Г. Семенов : патент 2772848 Российская Федерация. № 2022102977; заявл. 07.02.2022; опубл. 26.05.2022, Бюл. № 15.
10. Шарнирный наконечник тяги торсионного стабилизатора бокового наклона кузова вагона / Е. О. Белозерцев, А. В. Лозин, С. В. Павлов, А. Г. Семенов : патент 2777561 Российская Федерация. № 2022108951; заявл. 04.04.2022; опубл. 08.08.2022, Бюл. № 22.
11. Болтовое соединение для крепления цилиндрического тела в полусилиндрическом гнезде опорной детали / А. В. Лозин, С. В. Павлов, А. Г. Семенов : патент 2782732 Российская Федерация. № 2022102810; заявл. 04.02.2022; опубл. 01.11.2022, Бюл. № 31.
12. Шарнирный наконечник тяги торсионного стабилизатора бокового наклона кузова вагона / Е. О. Белозерцев, С. В. Павлов, А. Г. Семенов : патент 2788958 Российская Федерация. № 2022126979; заявл. 17.10.2022; опубл. 26.01.2023, Бюл. № 3.
13. Устройство взаимосвязи паспортной таблички и изделия, снабженного граненой гайкой / С. В. Павлов, А. Г. Семенов : патент 2789559 Российская Федерация. № 2022127605; заявл. 24.10.2022; опубл. 06.02.2023. Бюл. № 4.
14. Торсионный узел стабилизатора поперечной устойчивости кузова транспортного средства / Е. О. Белозерцев, С. В. Павлов : патент на полезную модель 200948 Российская Федерация. № 2020126220; заявл. 03.08.2020; опубл. 20.11.2020, Бюл. № 32.
15. Тяга торсионного стабилизатора поперечной устойчивости кузова транспортного средства / Е. О. Белозерцев, С. В. Пав-

## References

1. Heyd-Shop — Perlini. URL: <https://www.heyd-parts.de/shop/index.php?cat=c52> (access date: 11.03.2022).
2. Auto-shimming und auto-levelling. URL: <https://www.hemscheidt.de/produkte-services/federn/> (access date: 11.03.2022).
3. Solutions. URL: <https://www.ferrabyrne.co.uk/solutions> (access date: 11.03.2022).
4. The traction tip of a torsion stabilizer of the vehicle body lateral stability [Nakonechnik tyagi torsionnogo stabilizatora poperechnoy ustoychivosti kuzova transportnogo sredstva] / E. O. Belozertsev, S. V. Pavlov : patent 2738872 Russian Federation. No. 2020125363/11; filed 22.07.2020; publ. 17.12.2020, Bulletin No. 35.
5. The torsion unit of a lateral tilt stabilizer of a railcar body [Torsionnyy uzel stabilizatora bokovogo naklona kuzova vagona] / E. O. Belozertsev, S. V. Pavlov : patent 2743467 Russian Federation. No. 2020120370/11; filed 15.06.2020; publ. 18.02.2021, Bulletin No. 5.
6. Traction of a railcar torsion stabilizer [Tyaga torsionnogo stabilizatora vagona] / E. O. Belozertsev, S. V. Pavlov : patent 2743601 Russian Federation. No. 2020119963/11; filed 09.06.2020; publ. 20.02.2021, Bulletin No. 5.
7. Ball hinge [Sharovoy sharnir] / E. O. Belozertsev, A. V. Lozin, S. V. Pavlov : patent 2763301 Russian Federation. No. 2021126462; filed 07.09.2021; publ. 28.12.2021, Bulletin No. 1.
8. Stabilizer of lateral stability of a railway car body [Stabilizator poperechnoy ustoychivosti kuzova zheleznodorozhnogo vagona] / E. O. Belozertsev, A. V. Lozin, S. V. Pavlov : patent 2770029 Russian Federation. No. 2021126829; filed 10.09.2021; publ. 14.04.2022, Bulletin No. 11.
9. A set of traction of a lateral tilt torsion stabilizer of a railcar body and a leash of longitudinal relationship of the frame and the wheeled bogie of a railcar [Komplekt iz tyagi torsionnogo stabilizatora poperechnogo naklona kuzova vagona i povodka prodol'noy vzaimosvyazi ramy i kolesnoy telezhki vagona] / S. V. Pavlov, A. G. Semenov : patent 2772848 Russian Federation. No. 2022102977; filed 07.02.2022; publ. 26.05.2022, Bulletin No. 15.
10. The hinge tip of the traction of a lateral tilt torsion stabilizer of a railcar body [Sharnirnyy nakonechnik tyagi torsionnogo stabilizatora bokovogo naklona kuzova vagona] / E. O. Belozertsev, A. V. Lozin, S. V. Pavlov, A. G. Semenov : patent 2777561 Russian Federation. No. 2022108951; filed 04.04.2022; publ. 08.08.2022, Bulletin No. 22.
11. Bolted joint for fixing a cylindrical body in the semi-cylindrical socket of a support spare part [Boltovoe soedinenie dlya krepleniya tsilindricheskogo tela v polutsilindricheskom gnezde opornoy detali] / A. V. Lozin, S. V. Pavlov, A. G. Semenov : patent 2782732 Russian Federation. No. 2022102810; filed 04.02.2022; publ. 01.11.2022, Bulletin No. 31.
12. The hinge tip of the traction of a lateral tilt torsion stabilizer of a railcar body [Sharnirnyy nakonechnik tyagi torsionnogo stabilizatora bokovogo naklona kuzova vagona] / E. O. Belozertsev, S. V. Pavlov, A. G. Semenov : patent 2788958 Russian Federation. No. 2022126979; filed 17.10.2022; publ. 26.01.2023, Bulletin No. 3.
13. The interaction device between the nameplate and the item equipped with a faceted screw nut [Ustroystvo vzaimosvyazi pasportnoy tablitchki i izdeliya, snabzhenного granenoy gaykoy] / S. V. Pavlov, A. G. Semenov : patent 2789559 Russian Federation. No. 2022127605; filed 24.10.2022; publ. 06.02.2023. Bulletin No. 4.
14. The torsion unit of a stabilizer of the vehicle body lateral stability [Torsionnyy uzel stabilizatora poperechnoy ustoychivosti kuzova transportnogo sredstva] / E. O. Belozertsev, S. V. Pavlov : patent for utility model 200948 Russian Federation. No. 2020126220; filed 03.08.2020; publ. 20.11.2020, Bulletin No. 32.
15. The traction of a torsion stabilizer of the vehicle body lateral stability [Tyaga torsionnogo stabilizatora poperechnoy ustoychivosti

лов : патент на полезную модель 200957 Российская Федерация. № 2020125333; заявл. 22.07.2020; опубл. 20.11.2020, Бюл. № 32.

16. Наконечник тяги торсионного стабилизатора бокового наклона кузова транспортного средства / Е. О. Белозерцев, А. В. Лозин, С. В. Павлов : патент на полезную модель 202677 Российская Федерация. № 2020123303; заявл. 07.07.2020; опубл. 02.03.2021, Бюл. № 7.
17. Стабилизатор торсионный «ПРС 2002.20» / Е. О. Белозерцев, С. В. Павлов, А. Г. Семенов : патент на промышленный образец 133855 Российская Федерация. № 2022501867; заявл. 27.04.2022; опубл. 01.11.2022, Бюл. № 11.
18. Стабилизатор торсионный «ПРС.102.10» / Е. О. Белозерцев, С. В. Павлов, А. Г. Семенов : патент на промышленный образец 134251 Российская Федерация. № 2022502100; заявл. 17.05.2022; опубл. 29.11.2022, Бюл. № 12.
19. Павлов С. В., Лозин А. В., Семенов А. Г. Разработка торсионного узла стабилизатора поперечной устойчивости кузова вагона или иного транспортного средства // Инновационная железная дорога. Новейшие и перспективные системы обеспечения движения поездов. Проблемы и решения : сборник статей Международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург; Петергоф : ВАТТ, 2021. С. 246–256.
20. Павлов С. В., Лозин А. В., Семенов А. Г. Модернизация торсионного узла стабилизатора поперечной устойчивости вагона // Инновационная железная дорога. Новейшие и перспективные системы обеспечения движения поездов. Проблемы и решения : сборник статей Международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург; Петергоф : ВАТТ, 2021. С. 269–277.
21. Павлов С. В., Лозин А. В., Семенов А. Г. Разработка наконечника тяги торсионного стабилизатора поперечной устойчивости кузова железнодорожного вагона // Инновационная железная дорога. Новейшие и перспективные системы обеспечения движения поездов. Проблемы и решения : сборник статей Международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург; Петергоф : ВАТТ, 2021. С. 278–286.
22. Павлов С. В., Семенов А. Г. Разработка ресурсоемкой тяги наконечника тяги торсионного стабилизатора поперечной устойчивости кузова вагона или иного транспортного средства // Инновационная железная дорога. Новейшие и перспективные системы обеспечения движения поездов. Проблемы и решения : сборник статей Международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург; Петергоф : ВАТТ, 2021. С. 346–355.
23. Павлов С. В., Семенов А. Г. Модернизация тяги торсионного стабилизатора поперечной устойчивости кузова // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы Международной научно-технической конференции. Т. II. Тюмень : ТИУ, 2022. С. 283–286.
24. Павлов С. В., Семенов А. Г. Модернизация наконечника тяги торсионного стабилизатора поперечной устойчивости кузова // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы Международной научно-технической конференции. Т. II. Тюмень : ТИУ, 2022. С. 287–290.

kuzova transportnogo sredstva] / E. O. Belozertsev, S. V. Pavlov : patent for utility model 200957 Russian Federation. No. 2020125333; filed 22.07.2020; publ. 20.11.2020, Bulletin No. 32.

16. The traction tips of a torsion stabilizer of the vehicle body lateral tilt [Nakonechnik tyagi torsionnogo stabilizatora bokovogo naklona kuzova transportnogo sredstva] / E. O. Belozertsev, A. V. Lozin, S. V. Pavlov : patent for utility model 202677 Russian Federation. No. 2020123303; filed 07.07.2020; publ. 02.03.2021, Bulletin No. 7.
17. Torsion stabilizer «PRS 2002.20» [Stabilizator torsionnyy «PRS 2002.20»] / E. O. Belozertsev, S. V. Pavlov, A. G. Semenov : patent for industrial sample 133855 Russian Federation. No. 2022501867; filed 27.04.2022; publ. 01.11.2022, Bulletin No. 11.
18. Torsion stabilizer «PRS.102.10» [Stabilizator torsionnyy «PRS.102.10»] / E. O. Belozertsev, S. V. Pavlov, A. G. Semenov : patent for industrial sample 134251 Russian Federation. No. 2022502100; filed 17.05.2022; publ. 29.11.2022, Bulletin No. 12.
19. Pavlov S. V., Lozin A. V., Semenov A. G. Designing a torsion unit stabilizer of lateral stability for a railcar body or other vehicle [Razrabotka torsionnogo uzla stabilizatora poperechnoy ustoychivosti kuzova vagona ili inogo transportnogo sredstva] // Innovative railway. The latest and promising systems for ensuring the traffic service of trains. Challenges and solutions : collection of articles of the International scientific and technical conference. St. Petersburg; Peterhof, 2021. Pp. 246–256.
20. Pavlov S. V., Lozin A. V., Semenov A. G. Modernization of the torsion unit of a stabilizer of the railcar lateral stability [Modernizatsiya torsionnogo uzla stabilizatora poperechnoy ustoychivosti vagona] // Innovative railway. The latest and promising systems for ensuring the traffic service of trains. Challenges and solutions : collection of articles of the International scientific and technical conference. St. Petersburg; Peterhof, 2021. Pp. 269–277.
21. Pavlov S. V., Lozin A. V., Semenov A. G. Designing the traction tip of a torsion stabilizer of the railway car body lateral stability [Razrabotka nakonechnika tyagi torsionnogo stabilizatora poperechnoy ustoychivosti kuzova zheleznodorozhnogo vagona] // Innovative railway. The latest and promising systems for ensuring the traffic service of trains. Challenges and solutions : collection of articles of the International scientific and technical conference. St. Petersburg; Peterhof, 2021. Pp. 278–286.
22. Pavlov S. V., Semenov A. G. Designing a resource-intensive traction tip of the torsion stabilizer of lateral stability for a railcar body or other vehicle [Razrabotka resursoemkoy tyagi nakonechnika tyagi torsionnogo stabilizatora poperechnoy ustoychivosti kuzova vagona ili inogo transportnogo sredstva] // Innovative railway. The latest and promising systems for ensuring the traffic service of trains. Challenges and solutions : collection of articles of the International scientific and technical conference. St. Petersburg; Peterhof, 2021. С. 346–355.
23. Pavlov S. V., Semenov A. G. Modernization of traction of a lateral stability torsion stabilizer of a carriage body [Modernizatsiya tyagi torsionnogo stabilizatora poperechnoy ustoychivosti kuzova] // Transport and transport-technological systems : proceedings of the International scientific and technical conference. Vol. 2. Tyumen : TIU, 2022. Pp. 283–286.
24. Pavlov S. V., Semenov A. G. Modernization of the traction tip of a lateral stability torsion stabilizer of a carriage body [Modernizatsiya nakonechnika tyagi torsionnogo stabilizatora poperechnoy ustoychivosti kuzova] // Transport and transport-technological systems : proceedings of the International scientific and technical conference. Vol. 2. Tyumen : TIU, 2022. Pp. 287–290.

Объем статьи 0,7 авторских листа

УДК 656.224

Сергей Петрович Вакуленко, кандидат технических наук, профессор, директор Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Дмитрий Юрьевич Роменский, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Кирилл Антонович Калинин, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Мария Владимировна Роменская, старший преподаватель кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОЛИГОНА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ СЕТИ

Sergey Petrovich Vakulenko, PhD in Engineering, Professor, Head of Institute of Management and Digital Technologies, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Dmitriy Yuryevich Romenskiy, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Kirill Antonovich Kalinin, PhD in Engineering, Senior Lecturer, Transport Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Mariya Vladimirovna Romenskaya, Senior Lecturer, Transport Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

## Determining of the throughput capacity of railway testing facilities with different network configurations

### Аннотация

Переход к полигонным технологиям управления движением поездов на сети железных дорог Российской Федерации требует новых принципов расчета классических параметров и характеристик железнодорожного сообщения. В статье изложен разработанный авторами алгоритм расчета пропускной способности полигонов с разветвленной инфраструктурой, наличием множества параллельных маршрутов движения поездов и нелинейных связей между начальным и конечным пунктами следования поездопотока.

**Ключевые слова:** железнодорожный полигон, пропускная способность, перевозки, грузовые перевозки, пассажирские перевозки, транспортная сеть.

### Abstract

The transition to testing facility technologies for controlling train traffic on the railway network of the Russian Federation requires new principles for calculating classical parameters and characteristics of railway transportation service. This article describes the algorithm developed by the authors for calculating the throughput capacity of testing facilities with an extensive infrastructure, availability of multiple parallel train routes and non-linear connections between the initial point and final destination of a train flow.

**Keywords:** railway testing facilities, throughput capacity, transportation, freight transportation, passenger transportation, transport network.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-27-33

Определение пропускной способности перегонов и участков железнодорожной сети — традиционная задача для эксплуатационной науки. Разработки отечественной научной школы [1–3] заложены в основу инструкции по расчету наличной пропускной способности участков. Вместе с тем необходимо дальнейшее развитие и совершенствование подходов к определению пропускной и провозной способностей участков и управлению ими [4–6].

Действующая инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог ОАО «РЖД» устанавливает и регламентирует порядок расчета пропускных способностей для однопутных, двухпутных и многопутных перегонов при различных режимах движения по ним поездов. Заложенные в инструкции принципы используются для построения автоматизированных систем управления движением и для аналитики результатов перевозочной деятельности [7].

В соответствии с инструкцией расчет пропускной способности линии по отдельным участкам выполняется по каждому перегону, а результирующая пропускная способность участка определяется по ограничивающему перегону. Последний определяется как перегон, имеющий наименьшую пропускную способность среди всех перегонов рассматриваемого участка. Наличная пропускная способность участка зависит от множества факторов, таких как тип графика движения поездов, схема

прокладки поездов, применяемые системы централизации, путевое развитие участков и др. [8–10]. С использованием методики, приведенной в инструкции, можно определить пропускную и провозную способность линий со смешанным движением поездов при линейной структуре развития участка.

В случаях усложнения схемы путевого развития, появления множества параллельных маршрутов, перехода к управлению движением поездов не на отдельно взятых участках, а на железнодорожных полигонах в целом [11, 12] подход к определению пропускной способности отдельных участков не позволит получить общее представление о максимальном количестве поездов, которые возможно пропустить на данном полигоне.

Для дальнейшего анализа примем разветвленную схему железнодорожного полигона, включающую в себя множество точек  $p \in [1 \dots P]$ , соответствующих множеству железнодорожных станций (или отдельно взятых раздельных пунктов железнодорожной сети) в пределах рассматриваемого транспортного коридора, и множество ребер  $e \in [1 \dots E]$ , соответствующих отдельным участкам и перегонам, соединяющим рассматриваемые станции (рис. 1).

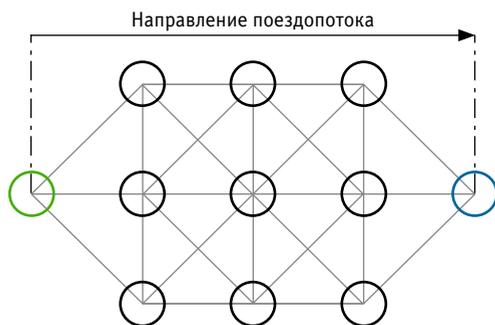


Рис. 1. Схема разветвленного транспортного полигона

Основное направление поездопотока происходит из основной точки отправления (входной элемент логистической системы обозначим как  $p_i$ ) в основную точку назначения (выходной элемент логистической системы обозначим как  $p_j$ ).

При разветвленной схеме полигона определение пропускной способности отдельных участков  $e$  между двумя точками множества  $p$ , обозначаемой как  $N_{p_i; p_j}^e$ , не позволит получить представление о максимальной пропускной способности полигона. Для оценки пропускной способности полигона необходимо ввести понятие «ограничивающее сечение полигона».

Ограничивающее сечение полигона — это совокупность его участков, пропускная способность которых является ограничивающей при максимально возможных размерах движения поездов между рассматриваемыми раздельными пунктами сети.

Поставленная задача схожа по формулировке с классическими задачами анализа графов и определения наименьшего их разреза (применительно к определению ограничений по железнодорожной инфраструктуре). Она может решаться с использованием алгоритма Штор — Вагнера или алгоритма Каргера. Алгоритм Штор — Вагнера позволяет определить «минимальный разрез» в графе, который может отразить пропускную способность, однако не позволяет определить оста-

точную пропускную способность ребер, не входящих в этот разрез. Что касается алгоритма Каргера, его недостатком является вероятностный характер полученных результатов, поэтому при оценке направления инвестиций в развитие железнодорожной инфраструктуры использование этого алгоритма нецелесообразно.

Максимальный поток в сети (применительно к максимальному количеству пропущенных поездов) определяется на основе алгоритма Форда — Фалкерсона и алгоритма Диница. Алгоритм Форда — Фалкерсона, который является одним из первых сформулированных подходов к решению задачи о нахождении максимального потока в сети, предполагает увеличение длины маршрута с каждой итерацией, оперирует только понятием пропускной способности линии и имеет значительную размерность решаемой задачи. Алгоритм Диница — более современный метод решения задачи о нахождении максимального потока, сформулированный советским математиком, однако его использование для расчета железнодорожного полигона не позволяет получить информацию о затратах на пропуск грузовых поездов по рассматриваемому направлению грузопотока.

Очевидно, что все эти алгоритмы не в полной мере можно применять при оценке пропускной способности железнодорожного полигона с дополнительной задачей по оптимизации затрат на проследование по нему поездов и выбору приоритетных участков для инвестиций в развитие его инфраструктуры [13–16].

Поэтому целесообразно дополнить упомянутые методы анализом затрат на пропуск поездов по участкам сети и разработкой приоритетности проследования этих поездов по рассматриваемому железнодорожному полигону.

Для разрабатываемого алгоритма введем следующие переменные:

- $i$  — индекс станции отправления в рамках рассматриваемого железнодорожного полигона,  $i \in p$ ;
- $j$  — индекс станции назначения в рамках рассматриваемого железнодорожного полигона,  $j \in p$ ;
- $k$  — индекс промежуточной станции, применяемый для поиска наиболее рационального способа пропуска грузовых поездов,  $k \in p$ ;
- $t$  — индекс выполняемой итерации при корректировке значений пропускной способности участков полигона, является натуральным числом ( $1 \leq t \leq E, t \in N$ ).

При использовании алгоритма определения пропускной способности полигона пропускная способность его участков будет изменяемой величиной, зависящей от выполняемой итерации  $t$ . Тогда наличную пропускную способность ребра  $e$  между пунктами  $p_i; p_j$  целесообразно обозначить как  $N_{нал; p_i; p_j}^e(t)$ .

Для анализа и определения пропускной способности ограничивающего сечения полигона  $N_{нал}^{сеч}$  в качестве исходных данных необходимо составить следующие матрицы:

матрицу затрат  $C$  на проследование по участку из пункта  $p_i$  в пункт  $p_j$  размерностью  $P \times P$ , каждый элемент которой, обозначаемый  $C_{p_i; p_j}$ , принимает значения приведенных затрат, выраженных в рублях или натуральных показателях работы железнодорожного комплекса (табл. 1);



матрицу назначений  $b$  проследования поезда из пункта  $p_i$  в пункт  $p_j$ , каждый элемент которой, обозначаемый  $b_{p_i;p_j} = j$ , является исходной матрицей для выполнения последующих преобразований (табл. 2);

матрицу пропускной способности участков  $d(t)$  между пунктами  $p_i$  и  $p_j$  размерностью  $P \times P$ , каждый элемент которой, обозначаемый  $N_{\text{нал } p_i; p_j}^e(t)$ , отображает остаточную пропускную способность участков после выполнения  $t$  итераций при  $t = 1$ ,  $N_{\text{нал } p_i; p_j}^e(t) = N_{p_i; p_j}^e$ .

Итоговые матрицы затрат на проследование поезда можно составить при помощи алгоритма Флойда — Уоршелла, позволяющего определить маршрут следования в графе, который будет обладать наименьшими суммарными затратами  $C_{p_i;p_j}(t)$  по анализируемому параметру. Применимость алгоритма Флойда — Уоршелла для описания транспортных процессов на железнодорожном транспорте рассмотрена в [17]. Выявленный маршрут проследования с затратами  $C_{p_i;p_j}(t)$  формирует упорядоченное множество  $V$ , содержащее ребра множества  $e$  таким образом, что  $V \subseteq e$ . В сформированном множестве  $V$  каждому вошедшему в него элементу соответствует пропускная способность  $N_{\text{нал } p_i; p_j}^e(t)$  из матрицы  $d(t)$ , элемент с наименьшей пропускной способностью является ограничивающим на шаге  $t$ , обозначим его как  $N_{\text{огр}}^t$ .

После нахождения  $N_{\text{огр}}^t$  схема рассматриваемого полигона подлежит корректировке:

$$N_{\text{нал } p_i; p_j}^e(t+1) = N_{\text{нал } p_i; p_j}^e(t) - N_{\text{огр}}^t. \quad (1)$$

Если после корректировки  $N_{\text{нал } p_i; p_j}^e(t)$  на ребре множества  $e$  пропускная способность равна нулю, это ребро убирается из множества и дальнейшего рассмотрения. После корректировки графа выполняется процедура определения нового маршрута проследования поездов с наименьшими приведенными затратами  $C_{p_i;p_j}(t+1)$ .

Общий вид матрицы затрат  $C$  на проследование поезда по участкам рассматриваемого полигона

	$p_1$	$p_2$	...	$P-1$	$P$
$p_1$	$C_{1;1}$	$C_{1;2}$	...	$C_{1;P-1}$	$C_{1;P}$
$p_2$	$C_{2;1}$	$C_{2;2}$	...	$C_{2;P-1}$	$C_{2;P}$
...	...	...	...	...	...
$P-1$	$C_{P-1;1}$	$C_{P-1;2}$	...	$C_{P-1;P-1}$	$C_{P-1;P}$
$P$	$C_{P;1}$	$C_{P;2}$	...	$C_{P;P-1}$	$C_{P;P}$

Таблица 1

Общий вид исходной матрицы назначений  $b$

	$p_1$	$p_2$	...	$P-1$	$P$
$p_1$	1	2	...	$P-1$	$P$
$p_2$	1	2	...	$P-1$	$P$
...	...	...	...	...	...
$P-1$	1	2	...	$P-1$	$P$
$P$	1	2	...	$P-1$	$P$

Таблица 2

В случае если на шаге  $t$  при использовании алгоритма маршрут проследования  $p_i; p_j$  не выявлен и затраты на его осуществление составляют  $C_{p_i;p_j}(t) = \infty$ , дальнейший расчет прекращается. Шаг расчета, при котором невозможно определить маршрут проследования, обозначим как  $t_{\text{max}}$ .

Тогда общая пропускная способность полигона железной дороги назначения поездов  $p_i; p_j$  составит

$$N_{\text{нал}}^{\text{сеч}} = \sum_{t=1}^{t_{\text{max}}-1} N_{\text{огр}}^t, \quad (2)$$

а общие приведенные затраты на пропуск поездов

$$C_{p_i;p_j}^{\text{сеч}} = \sum_{t=1}^{t_{\text{max}}-1} C_{p_i;p_j}^t. \quad (3)$$

Блок-схема описанного алгоритма приведена на рис. 2. Визуализация ал-

горитма, представленного на рис. 1, для  $t_{\text{max}} = 9$  показана на рис. 3, а схема полученного ограничивающего сечения для рассматриваемого примера с построением отображением маршрутов следования поездов корреспонденцией  $p_i; p_j$  — на рис. 4.

Размерность полученного алгоритма:

$$\theta = \begin{cases} P^3 & \text{при } t_{\text{max}} = 1; \\ P^3 \cdot t_{\text{max}} & \text{при } 1 \leq t_{\text{max}} \leq E; \\ P^3 \cdot E & \text{при } t_{\text{max}} = E. \end{cases} \quad (4)$$

Применение алгоритма позволило определить совокупность участков, которые являются ограничивающими при достижении максимальных размеров движения  $N_{\text{нал}}^{\text{сеч}}$  по корреспонденции  $p_i; p_j$ . Затраты на пропуск поездов минимизированы в результате итерационного расчета наименьших затрат на каждом шаге  $t$ .

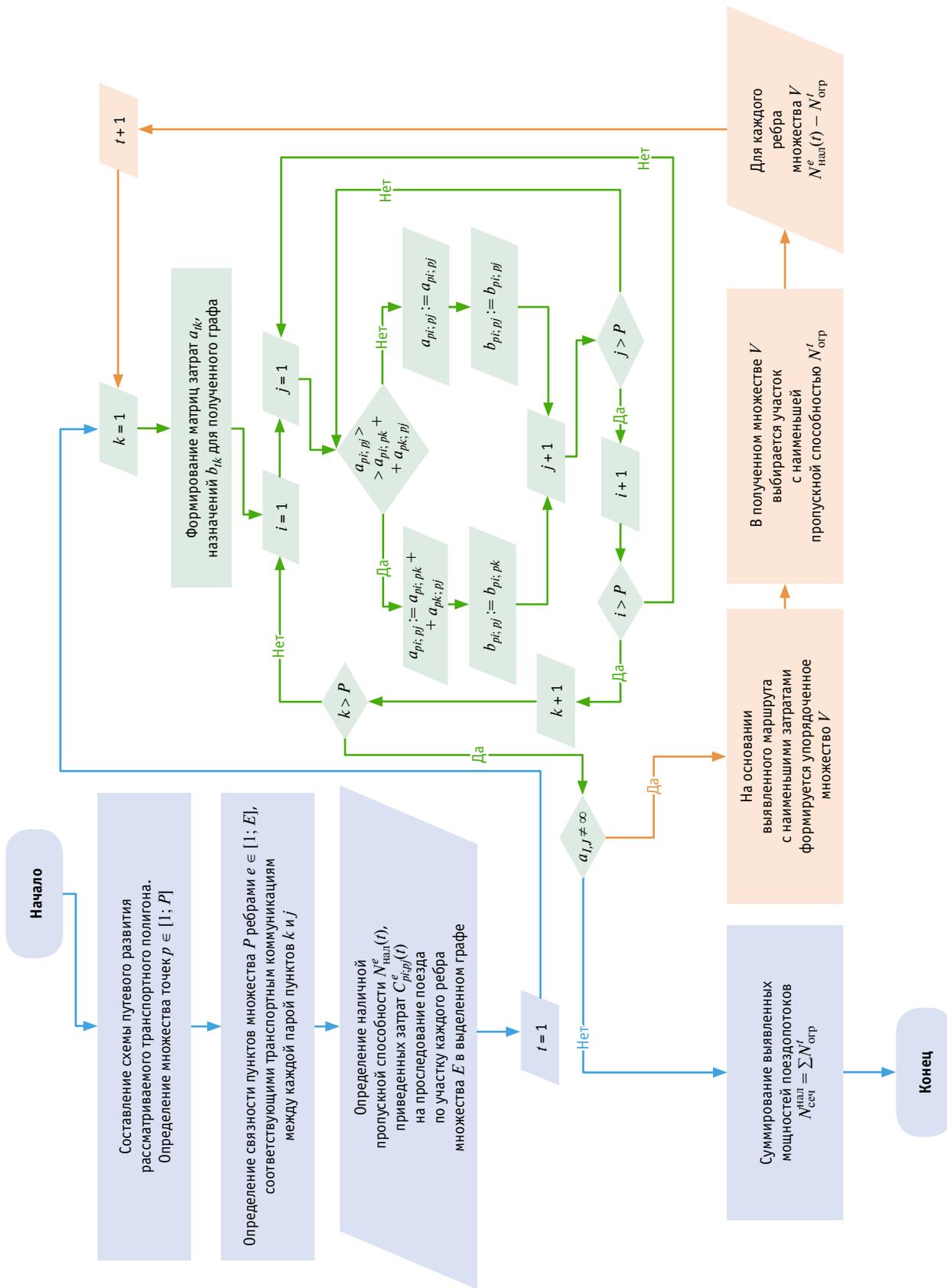
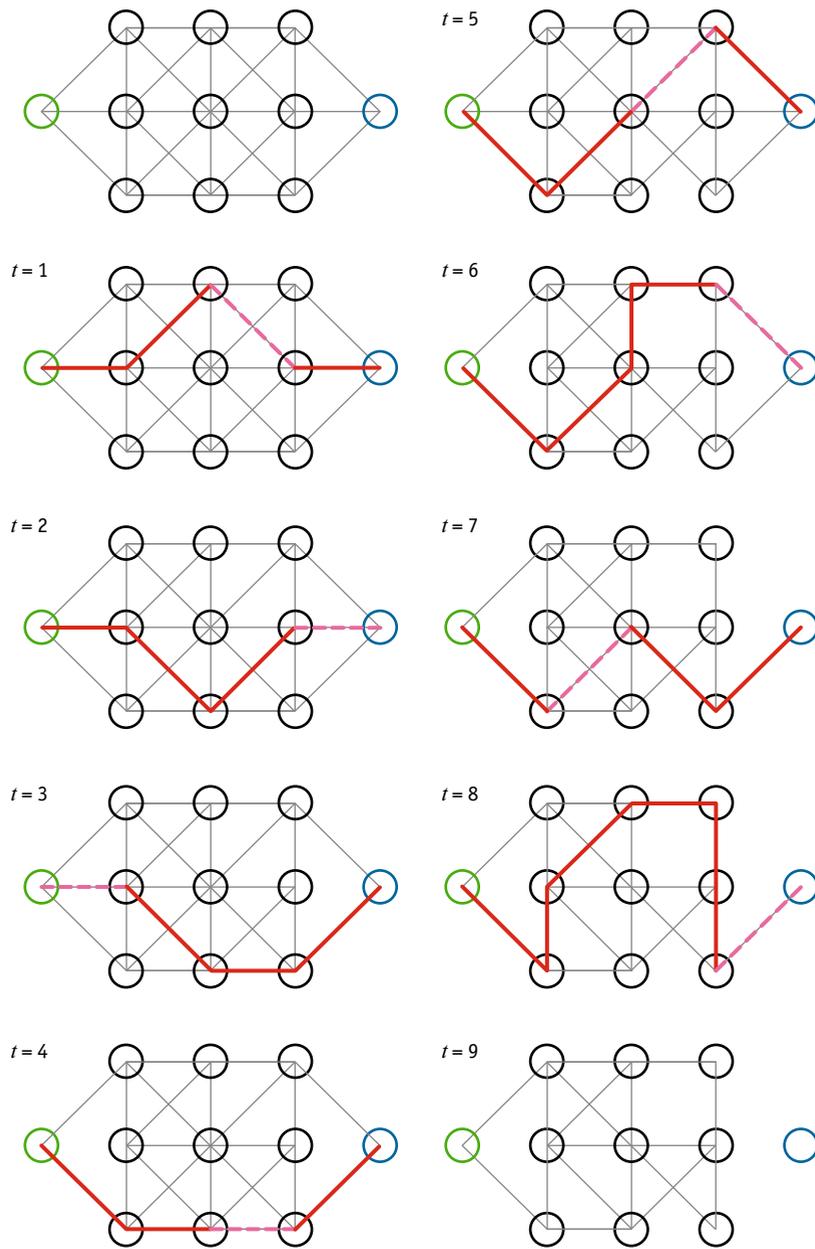
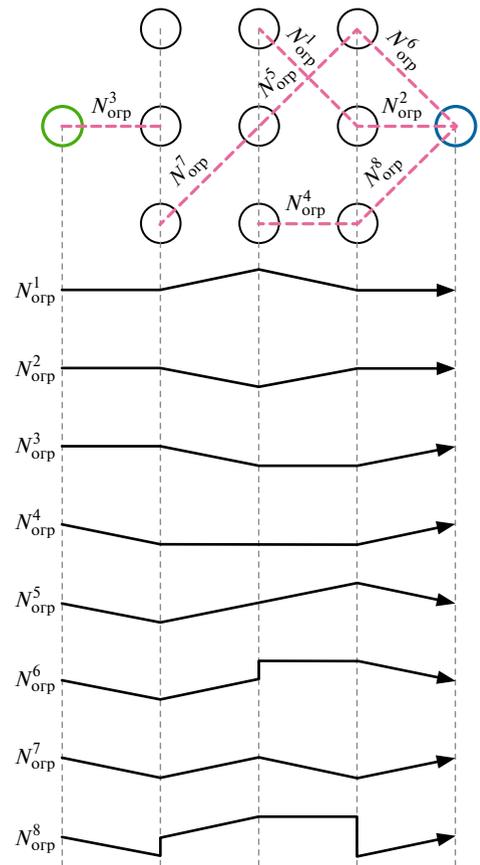


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения ограничивающего сечения транспортного полигона



**Рис. 3. Визуализация алгоритма определения ограничивающего сечения транспортного полигона:**

- ○ — станция отправления и станция назначения соответственно;
- промежуточная станция в пределах рассматриваемого железнодорожного полигона;
- — участок в пределах железнодорожного полигона, не используемый для пропуска поездов на рассматриваемой итерации;
- — участок в пределах железнодорожного полигона, используемый для пропуска поездов на рассматриваемой итерации;
- — участок в пределах железнодорожного полигона, являющийся ограничивающим на рассматриваемой итерации



**Рис. 4. Схема ограничивающего сечения при максимально возможных размерах движения поездов**

Таким образом, разработанный алгоритм применим при анализе пропускной и, как следствие, провозной способности железнодорожных полигонов. Он обладает допустимой размерностью и временем нахождения конечного результата, в ходе которого происходит перебор всех возможных вариантов проследования поездопотока на каждой итерации, что свидетельствует о выборе оптимального результата по определению максимальной пропускной способности полигона и минимизации затрат на пропуск по нему транспортных средств. Использование алгоритма возможно и целесообразно при оценке инвестиций в развитие железнодорожной сети Российской Федерации для определения эффектов от наращивания мощности и пропускной способности отдельных железнодорожных участков.

## Литература

1. Технология и организация перевозок на железнодорожном транспорте / Ф. С. Гоманков, Е. С. Прокофьева, Е. В. Бородина, В. В. Панин. Москва : УМЦ ЖДТ, 2018. 404 с.
2. Московский транспортный узел: перспективы развития / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Д. Ю. Роменский [и др.] ; Российский университет транспорта РУТ (МИИТ). Москва : Всероссийский институт научной и технической информации РАН, 2020. 208 с.
3. Вакуленко С. П., Куренков П. В., Садчикова В. А. Особенности расчета пропускной способности пограничных пунктов // Управление эксплуатационной работой на транспорте (Уэрт-2022) : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–16 марта 2022 г. Санкт-Петербург : Изд-во ПГУПС, 2022. С. 15–22.
4. Бессонова Н. В., Максимова Е. С., Батуринов А. П. График движения поездов и пропускная способность участков (в примерах и задачах). Курск : Университетская книга, 2022. 110 с.
5. Повышение и использование перевозочной мощности полигонов сети: эффективные стратегия и тактика / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, Е. А. Лаханкин [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2022. № 7. С. 8–16. ISSN 0044–4448.
6. Новое в расчетах интенсификации перевозок в условиях инфраструктурного развития полигонов сети железных дорог / М. А. Агеева, А. Ф. Бородин, Е. О. Дмитриев [и др.] // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт : сборник материалов научно-практической конференции АО «ВНИИЖТ», Щербинка, 26–27 августа 2021 г. Щербинка : АО «ВНИИЖТ», 2021. С. 4–12.
7. Панин В. В., Соколов А. Ю., Кириллова С. Ю. Развитие и применение автоматизированной системы «Паспорт наличной пропускной способности железных дорог ОАО «РЖД» // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». 2018. № 3. С. 61–65. ISSN 2500–3283.
8. Оценка баланса провозной способности полигонов сети железных дорог / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, М. А. Агеева [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2022. Т. 81. № 2. С. 158–169. DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-158-169. ISSN 2223–9731.
9. Оптимизация управления движением поездов / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Мелешин, Л. М. Чинь ; под ред. Л. А. Баранова. Москва : МИИТ, 2011. 163 с.
10. Сидоренко В. Г., Сафронов А. И. Методика выравнивания интервалов движения пассажирских поездов метрополитена в условиях ограниченных ресурсов // Вестник РГУПС. 2014. № 2 (54). С. 69–76. ISSN 0201–727X.
11. Панин В. В., Прокофьева Е. С., Рубцов Д. В. Оперативное управление эксплуатационной работой на полигонном уровне // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2017. № 2. С. 57–64. ISSN 2304–9642.
12. Комплексное развитие полигонов железнодорожной сети на основе инновационных технико-технологических решений / А. Ф. Бородин, Г. Г. Горбунов, С. А. Зинченко [и др.] // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт : сборник материалов научно-практической конференции АО «ВНИИЖТ», Щербинка, 26–27 августа 2021 г. Щербинка : АО «ВНИИЖТ», 2021. С. 28–37.
13. Политранспортная логистика перевозок каменного угля на Дальневосточном полигоне / С. П. Вакуленко, П. В. Куренков, Д. Ю. Роменский [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2021. № 8. С. 20–26. ISSN 0044–4448.

## References

1. Technology and organization of transportation in railway transport [Tehnologiya i organizatsiya perevozok na zheleznodorozhnom transporte] / F. S. Gomankov, E. S. Prokof'eva, E. V. Borodina, V. V. Panin. Moscow : UMTs ZhDT, 2018. 404 p.
2. Moscow transport hub: development prospects [Moskovskiy transportnyy uzel: perspektivy razvitiya] / S. P. Vakulenko, A. V. Kolin, D. Yu. Romenskiy [et al.] ; Russian University of Transport (MIIT). Moscow : All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, 2020. 208 p.
3. Vakulenko S. P., Kurenkov P. V., Sadchikova V. A. Peculiar features of calculating the throughput capacity of border posts [Osobennosti rascheta propusknoy sposobnosti pogranichnykh punktov] // Management of operational work in transport (MOW-2022) : proceedings of the International scientific and practical conference, St. Petersburg, March 15–16, 2022. St. Petersburg : Publishing House of PSTU, 2022. Pp. 15–22.
4. Bessonova N. V., Maximova E. S., Baturin A. P. Train schedule and throughput capacity of sections (on examples and tasks) [Grafik dvizheniya poezdov i propusknaya sposobnost' uchastkov (v primerakh i zadachakh)]. Kursk : University Book, 2022. 110 p.
5. Increasing and applying the transportation capacity of network testing facilities: effective strategy and tactics [Povyshenie i ispol'zovanie perevozochnoy moshhnosti poligonov seti: effektivnyye strategiya i taktika] / A. F. Borodin, V. V. Panin, E. A. Lakhankin [et al.] // Railway Transport. 2022. No. 7. Pp. 8–16. ISSN 0044–4448.
6. Advances in the calculations of traffic intensification in the conditions of infrastructural development of railway network testing facilities [Novoe v raschetakh intensivatsii perevozok v usloviyakh infrastruktornogo razvitiya poligonov seti zheleznykh dorog] / M. A. Ageeva, A. F. Borodin, E. O. Dmitriev [et al.] // Science 1520 JSC «VNIIZhT»: Look beyond the horizon : collection of proceedings of the scientific and practical conference of JSC «VNIIZhT», Shherbinka, August 26–27, 2021. Shherbinka : JSC «VNIIZhT», 2021. Pp. 4–12.
7. Panin V. V., Sokolov A. Yu., Kirillova S. Yu. Development and application of the automated system «Passport of available railway throughput capacity of JSC Russian Railways» [Razvitie i primeneniye avtomatizirovannoy sistemy «Pasport nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog ОАО «RZhD»] // Bulletin of the Scientific Council of JSC «IETD» (Institute of Economics and Transport Development). 2018. No. 3. Pp. 61–65. ISSN 2500–3283.
8. Assessment of transportation capacity balance of railway network polygons [Otsenka balansa provoznoy sposobnosti poligonov seti zheleznykh dorog] / A. F. Borodin, V. V. Panin, M. A. Ageeva [et al.] // Russian Railway Science Journal. 2022. Vol. 81. No. 2. Pp. 158–169. DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-158-169. ISSN 2223–9731.
9. Optimizing the train traffic management [Optimizatsiya upravleniya dvizheniem poezdov] / L. A. Baranov, E. V. Erofeev, I. S. Meleshin, L. M. Chir' ; ed. by L. A. Baranov. Moscow : MIIT, 2011. 163 p.
10. Sidorenko V. G., Safronov A. I. Method of alignment of traffic intervals of underground passenger trains in the conditions of limited resources [Metodika vyravnivaniya intervalov dvizheniya passazhirskikh poezdov metropolitena v usloviyakh ogranichennykh resursov] // Vestnik RGUPS. 2014. No. 2 (54). Pp. 69–76. ISSN 0201–727X.
11. Panin V. V., Prokof'eva E. S., Rubtsov D. V. In-process control of field operation at the operating domain level [Operativnoye upravlenie ekspluatatsionnoy raboty na poligonnom уровне] // Bulletin of Joint Scientific Council of JSC Russian Railways. 2017. No. 2. Pp. 57–64. ISSN 2304–9642.
12. Comprehensive development of the railway network testing facilities based on innovative technical and technological solutions [Kompleksnoye razvitie poligonov zheleznodorozhnoy seti na osnove innovatsionnykh tekhniko-tekhnologicheskikh resheniy] / A. F. Borodin, G. G. Gorbunov, S. A. Zinchenko [et al.] // Science 1520 JSC «VNIIZhT»: Look beyond the horizon : collection of proceedings of the scientific and practical conference of JSC «VNIIZhT», Shherbinka, August 26–27, 2021. Shherbinka : JSC «VNIIZhT», 2021. Pp. 28–37.
13. Polytransport logistics of coal transportation at the Far Eastern testing facilities [Politransportnaya logistika perevozok kamennogo uglya na Dal'ne-

14. Возможность возвращения грузовых перевозок на главный железнодорожный ход Санкт-Петербург — Москва / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, П. А. Егоров, К. А. Калинин // Экономика железных дорог. 2021. № 12. С. 31–42. ISSN 1727–6500.
  15. Экологический аспект организации грузового обхода в створе коридора «Центр — Юг» / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Д. Ю. Роменский, К. А. Калинин // Вестник УрГУПС. 2021. № 1 (49). С. 82–92. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-1-82-92. ISSN 2079–0392.
  16. Куренков П. В., Сафронова А. А., Хачатрян С. Э. Логистика импортозамещения в промышленности и на транспорте в условиях экономических санкций // Логистика — евразийский мост : материалы XVII Международной научно-практической конференции, Красноярск, 27–30 апреля 2022 г. Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2022. С. 152–157.
  17. Эксплуатационные аспекты моделирования транспортных систем / С. П. Вакуленко, Н. Ю. Евреенова, Д. Ю. Роменский, К. А. Калинин. Москва : РУТ (МИИТ), 2021. 129 с.
- vostochnom poligone] / S. P. Vakulenko, P. V. Kurenkov, D. Yu. Romenskiy [et al.] // Railway Transport. 2021. No. 8. Pp. 20–26. ISSN 0044–4448.
  14. The possibility of returning freight traffic to the main railway line St. Petersburg — Moscow [Vozmozhnost' vozvrashheniya gruzovykh perevozok na glavnyy zheleznodorozhnyy khod Sankt-Peterburg — Moskva] / S. P. Vakulenko, A. V. Kolin, P. A. Egorov, K. A. Kalinin // Railway Economy. 2021. No. 12. Pp. 31–42. ISSN 1727–6500.
  15. Environmental aspect of the organization of cargo bypass in the alignment of the corridor «Center — South» [Ekologicheskiy aspekt organizatsii gruzovogo obkhoda v stvore koridora «Tsentr — Yug»] / S. P. Vakulenko, A. V. Kolin, D. Yu. Romenskiy, K. A. Kalinin // Herald of USURT. 2021. No. 1 (49). Pp. 82–92. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-1-82-92. ISSN 2079–0392.
  16. Kurenkov P. V., Safronova A. A., Khachatryan S. E. Logistics of import substitution in production sector and transport in the conditions of economic sanctions [Logistika importozameshheniya v promyshlennosti i na transporte v usloviyakh ekonomicheskikh sanktsiy] // Logistics — the Eurasian Bridge : proceedings of the 17th International scientific and practical conference, Krasnoyarsk, April 27–30, 2022. Krasnoyarsk : Krasnoyarsk State Agrarian University, 2022. Pp. 152–157.
  17. Operational aspects of transport system modeling [Ekspluatatsionnye aspekty modelirovaniya transportnykh sistem] / S. P. Vakulenko, N. Yu. Evreenova, D. Yu. Romenskiy, K. A. Kalinin. Moscow : RUT (MIIT), 2021. 129 p.

Объем статьи 0,78 авторских листа

УДК 656.13

Елена Владимировна Швецова, старший преподаватель кафедры интеллектуальных информационных технологий Брестского государственного технического университета (БрГТУ), Брест, Республика Беларусь, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-1613-6645>,

Василий Николаевич Шуть, кандидат технических наук, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий Брестского государственного технического университета (БрГТУ), Брест, Республика Беларусь, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-7979-6157>

## АЛГОРИТМ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗОК НА ОСНОВЕ КРИТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА МАТРИЦЫ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ

Elena Vladimirovna Shvetsova, Senior Lecturer, Intelligent Information Technologies Department, Brest State Technical University (BSTU), Brest, Belarus,

Vasiliy Nikolaevich Shut', PhD in Engineering, Associate Professor, Intelligent Information Technologies Department, Brest State Technical University (BSTU), Brest, Belarus

### The algorithm of transportation organization based on the critical element of a correspondence matrix

#### Аннотация

Рассмотрена пассажирская городская транспортная система на базе беспилотного автоматического транспорта малой вместимости, являющаяся замкнутой, т.е. функционирующей самостоятельно — без участия человека. Сбор, анализ данных и организация перевозок в такой системе осуществляются при помощи информационных технологий и интеллектуальных алгоритмов. Информационной основой для составления плана перевозок служит матрица корреспонденций.

Предложен алгоритм составления плана перевозок на основе матрицы корреспонденций, в которой выделяется критический элемент, соответствующий условию достаточного накопления заявок на перевозку. Кроме того, алгоритм предусматривает возможность дополнительного попутного подвоза пассажиров.

Показано, что предложенный алгоритм позволяет достичь уровня, сопоставимого с комфортом поездки в такси, но при этом экономический эффект от перевозки выше, чем у такси, за счет большего числа пассажиров, осуществляющих совместную поездку.

Рассмотренная модель направлена на повышение мобильности и гибкости пассажирских перевозок в условиях интенсивных транспортных потоков и отличается экономическими и экологическими выгодами, поскольку метод перевозки пассажиров беспилотными транспортными средствами обеспечивает высокую провозную способность городских транспортных систем и высокий уровень комфорта пассажиров на маршруте.

**Ключевые слова:** автоматический транспорт, информационно-транспортная система, матрица корреспонденций, алгоритм организации перевозок, инфобус.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-34-40

#### Abstract

The passenger urban transport system based on unmanned automatic transport of small capacity, which is closed, i.e. functioning independently — without human participation, is considered. Data collection, analysis and organization of transportation in such system are carried out using information technologies and intelligent algorithms. The correspondence matrix serves as an information basis for drafting a transportation plan.

An algorithm for drawing up a transportation plan based on the correspondence matrix is proposed, in which the critical element correlates with the condition of sufficient accumulation of requests for transportation. In addition, the algorithm provides the possibility of in-passing transportation of passengers.

It is demonstrated that the proposed algorithm makes it possible to achieve a level of comfort comparable to the comfort of a taxi ride, but at the same time, the economic effect of transportation is higher than that of a taxi, due to a larger number of passengers traveling together.

The considered model is aimed at increasing the mobility and flexibility of passenger transportation in conditions of high traffic flows and is distinguished by economic and environmental benefits, since the method of passenger transportation by unmanned vehicles provides high carrying capacity of urban transport systems with a high level of passenger comfort on the route.

**Keywords:** automatic transport, information and transport system, correspondence matrix, transportation arrangement algorithm, infobus.

## ВВЕДЕНИЕ

**Н**еуклонный рост городского населения приводит к необходимости пересмотра принципов городской мобильности в сторону доминирования общественного экологичного пассажирского транспорта, способного предоставлять уровень комфорта поездки, который будет сопоставим с комфортом поездки на частном автомобиле. Например, в некоторых странах (в США, Великобритании) появился такой вид транспорта, как Personal Rapid Transit (PRT), или ПАТ (персональный автоматический транспорт). Этот вид городского и пригородного транспорта автоматически (без водителя) перевозит пассажиров в режиме такси, используя сеть выделенных путей. Кроме того, на смену традиционным приходят транспортные системы нового типа, основанные на использовании интеллектуальных информационных и телекоммуникационных технологий, т.е. информационно-транспортные системы (ИТС). В статье представлены концепция ИТС на базе беспилотных транспортных средств и алгоритм организации ПАТ — перевозок на основе обработки матрицы корреспонденций.

## ИНФОРМАЦИОННО-ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЭЛЕКТРОКАРОВ

Подробно городская пассажирская информационно-транспортная система рассмотрена в работах [1–5].

Основная транспортная единица в ИТС — беспилотный электрокар малой вместимости (до 30 мест), называемый инфобусом. Инфобусы в автономном режиме совершают поездки по рельсовому пути фиксированным маршрутом из  $k$  остановок в двух направлениях. В начале и в конце каждого направления находятся накопители, в которых транспортные средства ожидают нового рейса, а также могут осуществить подзарядку. Перекрестки преодолеваются либо по эстакадам, либо по подземным тоннелям (рис. 1), тем самым инфобусы представляют собой транспортные средства с высшим приоритетом движения.

Движение инфобусов осуществляется как автономно, так и в составе кассеты, которая представляет собой транспортное средство с разделяющимися частями

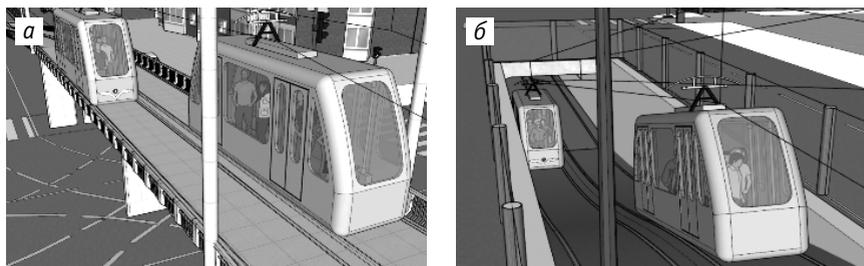


Рис. 1. Преодоление перекрестков:  
а — по эстакаде; б — по подземному тоннелю

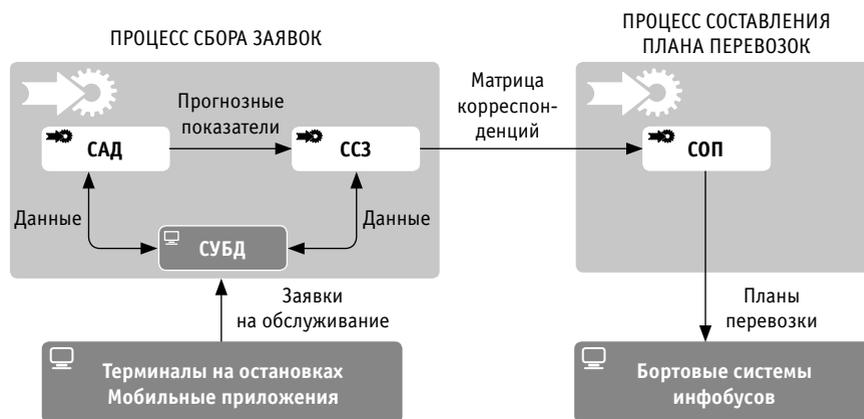


Рис. 2. Структура единого информационного сервера ИТС

ID integer	Origin integer	Destination integer	SeatsNumber integer	TimeRequest timestamp without time zone
109122	3	7	1	2021-06-16 00:07:57.07
109130	8	10	1	2021-06-16 00:08:11.08
109131	2	7	1	2021-09-02 10:18:09.18
109135	4	7	1	2021-09-02 10:18:18.18
109137	4	10	1	2021-09-02 10:18:23.18
109141	1	5	1	2021-09-02 10:40:51.4
109142	8	9	1	2021-09-02 10:40:55.4

Рис. 3. Информация о сохраненных заявках в базе данных

ми [6–10]. В кассете, двигаясь совместно и синхронно, инфобусы образуют транспортное средство новой вместимости. При необходимости инфобус может отсоединиться от кассеты и продолжить движение самостоятельно.

Каждый инфобус оснащен бортовой системой, получающей управляющие сигналы от единого информационного сервера ИТС (рис. 2), включающего в себя систему сбора заявок (ССЗ), систему анализа данных (САД) и систему организации перевозок (СОП).

Сбор заявок от пассажиров на перевозку осуществляется через термина-

лы на остановках либо через мобильные приложения. Заявки пересылаются в ССЗ и сохраняются в базе данных в виде временного ряда (здесь под временным рядом понимается последовательность записей с информацией о заявках на перевозку, каждая из которых имеет временную метку, располагающую запись хронологически на «оси времени»). На рис. 3 показано, что каждая заявка характеризуется идентификатором (ID), остановкой отправления (Origin), остановкой назначения (Destination), числом посадочных мест (SeatsNumber), временем регистрации (TimeRequest).

На основе записей базы данных системой сбора заявок формируется матрица корреспонденций  $M_z, Z = 1, 2, \dots$ , в которой каждый элемент  $m_{ij}$  определяет число пассажиров, следующих с остановки  $i$  на остановку  $j, i (j = 1, \dots, k)$  (рис. 4). Здесь  $k$  — число остановок одного направления маршрута. Очевидно, что элементы матрицы  $M_z$  на главной диагонали и под главной диагональю равны нулю, так как предполагается, что пассажир не может выйти на остановке, на которой сел, и не может ехать назад.

$$M_z = \begin{pmatrix} 0 & m_{12} & m_{13} & \dots & \dots & m_{1j} & \dots & m_{1k} \\ 0 & 0 & m_{23} & \dots & \dots & m_{2j} & \dots & m_{2k} \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & m_{ii+1} & \dots & m_{ij} & \dots & m_{ik} \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & m_{k-1k} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

Рис. 4. Матрица корреспонденций  $M_z$

Всякий раз при поступлении новой заявки в ССЗ система отслеживает выполнение условия достаточного накопления заявок (которое зависит от применяемого алгоритма организации перевозок). В предложенном в работе алгоритме достаточное накопление заявок наступает, когда некоторый элемент  $m_{i^*j^*}$  матрицы  $M_z$ , далее называемый критическим элементом, начинает удовлетворять условию

$$m_{i^*j^*} \geq a \cdot V, a \in [0.6, 1), i^* = \overline{1, k-1}, j^* = \overline{2, k}, \quad (1)$$

где  $V$  — число посадочных мест в инфобусе (далее — объем инфобуса);

$a$  — коэффициент эластичности, используемый для резерва мест потенциальных пассажиров, которые могут подойти на остановку от момента отправления транспортного средства из накопителя к моменту прибытия транспортного средства на остановку  $i^*$ .

Как только условие (1) выполняется, сервер на основе собранного временного ряда фиксирует матрицу корреспонденций, составляет по ней планы перевозки, которые сразу же пересылаются бортовым системам инфобусов (см. рис. 2).

План включает в себя определение числа инфобусов, участвующих в перевозке, остановки посадки-высадки пассажиров, идентификаторы заявок, которые будут обслужены в текущем плане перевозки, и графики движения транспортных средств (алгоритм составления графиков движения был подробно описан в [11, 12]).

В представленной статье рассматривается алгоритм составления плана перевозки для критического элемента матрицы корреспонденций. В перевозке по этому алгоритму участвует только один инфобус, основная цель которого — доставить пассажиров с остановки  $i^*$  на остановку  $j^*$ . Причем все пассажиры будут доставлены в нужный им пункт без промежуточных остановок. Во время следования от накопителя 1 до оста-

новки  $i^*$  и от остановки  $j^*$  до накопителя 2 инфобус, согласно алгоритму, совершает еще дополнительный подвоз пассажиров, что делает перевозку более эффективной.

### ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Фиксация матрицы корреспонденций системой сбора заявок сервера ИТС и начало составления плана перевозки наступают в момент, когда некоторый элемент  $m_{i^*j^*}$  матрицы ( $i^* < j^*, j^* = \overline{2, k}, i^* = \overline{1, k-1}$ ), называемый критическим элементом, начинает удовлетворять условию (1) (рис. 5). Это указывает на достаточное накопление пассажиров на остановке  $i^*$ , желающих ехать на остановку  $j^*$ . С остановки  $i^*$  все пассажиры забираются и перевозятся прямо на остановку  $j^*$  без промежуточных остановок.

При движении от накопителя к остановке  $i^*$  инфобус может также осуществить дополнительный подвоз пассажиров, желающих попасть с остановок  $1, \dots, (i^* - 1)$  на остановку  $i^*$ .

Элементы матрицы корреспонденций, соответствующие их заявкам, находятся в столбце  $i^*$  со строки 1 по строку  $(i^* - 1)$  (см. рис. 5), образуют множество заявок дополнительного подвоза  $J_{at}$  (additional transportation) и должны удовлетворять условию

$$\begin{cases} \sum_{1 \leq i \leq i^* - 1, i \in N} m_{ii^*} \rightarrow \max \\ \sum_{1 \leq i \leq i^* - 1, i \in N} m_{ii^*} \leq V. \end{cases} \quad (2)$$

$m_{11}$	$m_{12}$	...	...	...	$m_{1i^*}$	...	...	...	$m_{1j^*}$	...	...	$m_{1k-1}$	$m_{1k}$
0	0	$m_{23}$	...	...	$m_{2i^*}$	...	...	...	$m_{2j^*}$	...	...	$m_{2k-1}$	$m_{2k}$
0	0	0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	$m_{3k-1}$	$m_{3k}$
...	...	...	...	...	$m_{(i^*-1)i^*}$	...	...	...	...	...	...	...	...
0	0	0	0	0	...	...	...	...	$m_{i^*j^*}$	...	...	...	$m_{i^*k}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0	0	0	0	0	0	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$m_{k-1k}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 5. Матрица корреспонденций  $M_z$ , критический элемент и потенциальное множество дополнительного подвоза

Нахождение таких элементов в столбце  $i^*$  происходит итеративно: на каждой итерации среди элементов  $m_{ii^*}, 1 \leq i \leq i^* - 1$  выбирается максимальный элемент из еще не рассмотренных элементов, и если он в совокупности с отобранными на предыдущих итерациях элементами не превышает объем инфобуса, то добавляется к сумме  $\sum_{1 \leq i \leq i^* - 1, i \in N} m_{ii^*}$ . В противном случае

элемент исключается из рассмотрения. Формирование множества  $J_{at}$  продолжается либо до рассмотрения всех элементов  $m_{ij^*}, 1 \leq i \leq i^* - 1$ , либо до превышения суммой отобранных элементов объема инфобуса  $V$ . Остановки отправления, вошедшие во множество  $J_{ar}$  образуют множество остановок дополнительного подвоза  $S_{at}$  (stations of additional transportation).

Рассмотрим алгоритм формирования множеств  $J_{at}$  и  $S_{at}$  на примере матрицы корреспонденций  $M_z$ , представленной на рис. 6. При этом объем инфобуса  $V$  равен 25, число остановок маршрута — 14. Здесь критическим элементом выступает элемент  $m_{59}$ , равный 20.

Для дополнительного подвоза рассматриваются заявки на поездку на пятую остановку с предыдущих четырех, т.е. элементы  $m_{i5}, 1 \leq i \leq 4$ . Первым во множество  $J_{at}$  войдет элемент  $m_{15} = 15$ . Элемент  $m_{25} = 14$  исключается, так как в сумме с уже отобранным элементом превышает объем инфобуса  $V$ . На третьей итерации выбирается элемент  $m_{45} = 4$ , на четвертой —  $m_{35} = 3$ . На этом отбор заканчивается, поскольку все элементы  $m_{i5}, 1 \leq i \leq 4$  рассмотрены. Таким образом, сформировано множество заявок дополнительного подвоза  $J_{at} = \{m_{15}, m_{35}, m_{45}\} = \{15, 3, 4\}$  и множество остановок дополнительного подвоза  $S_{at} = \{1, 3, 4\}$ .

Так как инфобус будет останавливаться на остановках множества  $S_{ar}$  то можно еще осуществить перевозку пассажиров, желающих ехать с одной остановки множества  $S_{ar}$  на другую, при условии что они не будут составлять конкуренцию пассажирам дополнительного подвоза (в рассматриваемом случае, например, с первой остановки на третью или четвертую, с третьей на четвертую). Множество таких заявок назовем множеством заявок попутного подвоза (passing transportation)  $J_{pt}$ .

$$M_z = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 11 & \boxed{15} & 3 & 3 & 3 & 7 & 1 & 0 & 1 & 0 & 11 \\ 0 & 0 & 3 & 1 & 14 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \boxed{3} & 6 & 2 & 0 & 3 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{4} & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 4 & 2 & 1 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 8 & \boxed{20} & 1 & 7 & 5 & 3 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 7 & 1 & 0 & 7 & 2 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 4 & 2 & 0 & 2 & 1 & 14 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 & 2 & 7 & 6 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 10 & 5 & 4 & 12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 11 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Рис. 6. Критический элемент и элементы множества дополнительного подвоза  $J_{at}$

Множество  $J_{pt}$  определяется итерационно путем перебора всех ненулевых элементов  $m_{ij}, i, j \in S_{ar}, i < j$  матрицы  $M_z$  для которых выполняется условие

$$\begin{cases} m_{ij} < V - \sum_{s \in S_{at}, s < j} m_{si^*} - \sum_{m_{sk} \in J_{pt}} m_{sk} + \sum_{\substack{m_{sk} \in J_{pt} \\ s < i, k \leq i}} m_{sk} \\ i, j \in S_{at}, i < j \end{cases} \quad (3)$$

где  $V$  — объем инфобуса;

$\sum_{s \in S_{at}, s < j} m_{si^*}$  — сумма элементов множества  $J_{ar}$  соответствующих заявкам пассажиров, которые должны занять места в инфобусе при его следовании от остановки  $i$  к остановке  $j$ ;

$\sum_{m_{sk} \in J_{pt}} m_{sk}$  — места, уже занятые определенными пассажирами попутного подвоза, эта сумма рекурсивно увеличивается на каждой итерации на элемент  $m_{ij}$  если он удовлетворяет условию (3);

$\sum_{m_{sk} \in J_{pt}, s < i, k \leq i} m_{sk}$  — объем освободившихся в салоне мест за счет вышедших пассажиров попутного подвоза до остановки  $i$  включительно, эта величина рассчитывается на каждой итерации алгоритма.

Алгоритм определения элементов попутного подвоза представлен в блок-схеме на рис. 7. В блок-схеме под  $\inf S_{at}$  (инфимум  $S_{at}$ ) подразумевается точная нижняя граница множества  $S_{ar}$  а под  $\sup S_{at}$  (супремум  $S_{at}$ ) — точная верхняя граница множества  $S_{ar}$ .

Рассмотрим нахождение заявок попутного подвоза для матрицы  $M_z$ , представленной на рис. 6. Согласно условию из системы (3)  $i, j \in S_{at} = \{1, 3, 4\}, i < j$ , потенциальные кандидаты на попутный подвоз  $m_{13}, m_{14}, m_{34}$ .

При анализе элемента  $m_{13}$  множество  $J_{pt}$  пусто, так как еще ни один элемент не определен для попутного подвоза. Пусто и множество вышедших пассажиров попутного подвоза на первой остановке  $\sum_{\substack{m_{sk} \in J_{pt} \\ s < 1, k \leq 1}} m_{sk}$ .

полнительного подвоза с остановки 1 до остановки 3 состоит из элемента  $m_{15} = 15$ :

$$\begin{aligned} m_{13} &= 2 \leq V - \sum_{m_{sk} \in J_{at}, s < 3} m_{sk} - \sum_{m_{sk} \in J_{pt}} m_{sk} + \sum_{\substack{m_{sk} \in J_{pt} \\ s < 1, k \leq 1}} m_{sk} = \\ &= 25 - 15 - 0 + 0 = 10 \Rightarrow J_{pt} = \{m_{13}\} = 2. \end{aligned}$$

Для элемента  $m_{14} = 11$  множество  $J_{pt} = \{m_{13}\} = \{2\}$ , множество элементов дополнительного подвоза с остановки 1 по остановку 4 будет состоять из  $\{m_{15}, m_{35}\} = \{15, 3\}$ . Вышедших пассажиров на первой остановке нет. Но, тем не менее, мест для пассажиров элемента  $m_{14}$  не хватит, и его заявки не войдут в попутный подвоз:

$$\begin{aligned} m_{14} &= 11 > V - \sum_{m_{s5} \in J_{at}, s < 4} m_{s5} - \sum_{m_{sk} \in J_{pt}} m_{sk} + \sum_{\substack{m_{sk} \in J_{pt} \\ s < 1, k \leq 1}} m_{sk} = \\ &= 25 - (15 + 3) - 2 + 0 = 5 \Rightarrow J_{pt} = \{m_{13}\}. \end{aligned}$$

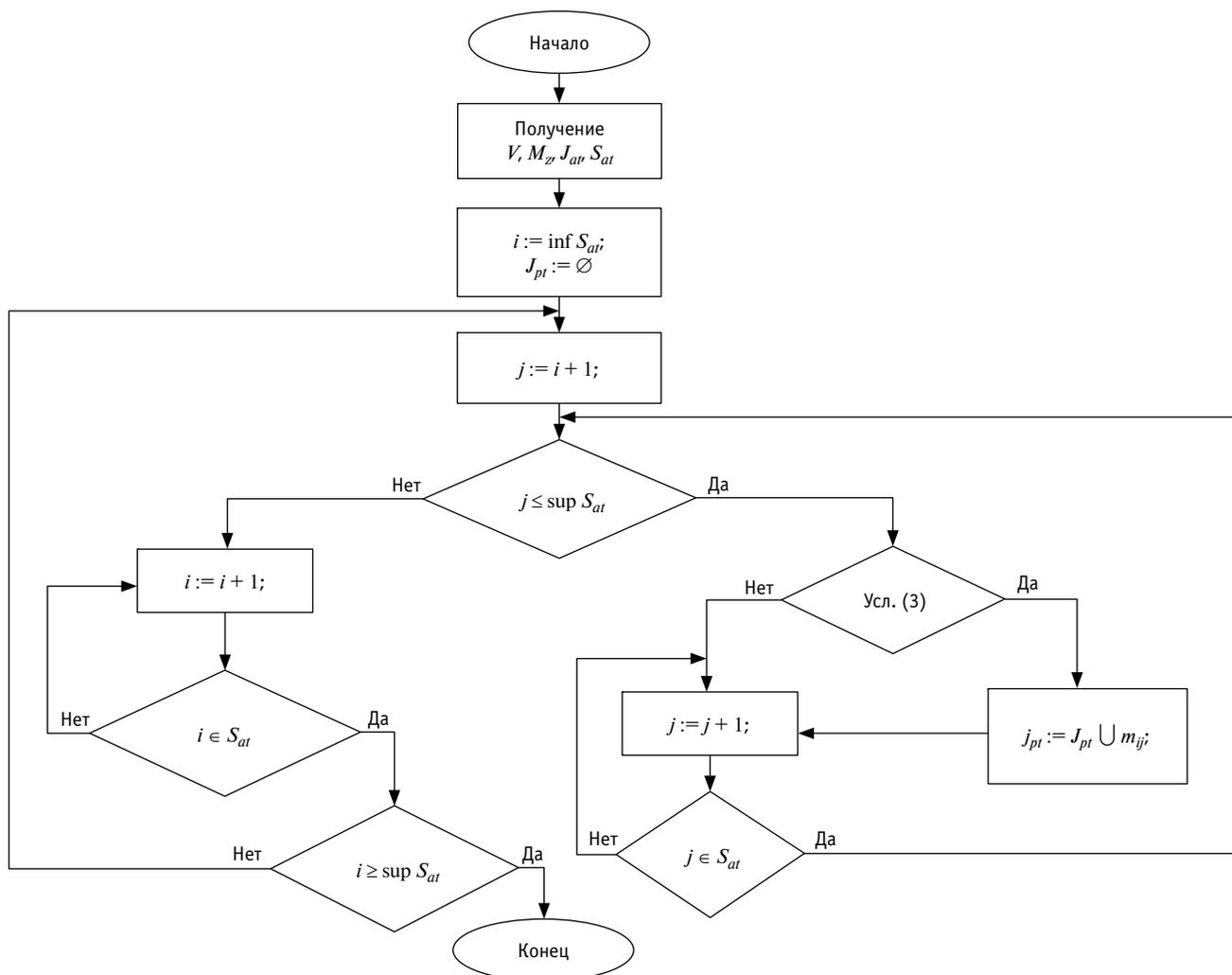


Рис. 7. Блок-схема алгоритма нахождения множества попутного подвоза  $J_{pt}$

Множество элементов дополнительного подвоза с остановки 3 по остановку 4 будет состоять из  $\{m_{15}, m_{35}\} = \{15, 3\}$ . Для элемента  $m_{34}$  множество  $J_{pt} = \{2\}$ . А сумма мест, освободившихся от вышедших пассажиров попутного подвоза,

$$\sum_{m_{sk} \in J_{pt}, s < 3, k \leq 3} m_{sk} = m_{13} = 2.$$

$$m_{34} = 1 \leq V - \sum_{m_{s5} \in J_{at}, s < 4} m_{sk} - \sum_{m_{sk} \in J_{pt}} m_{sk} + \sum_{m_{sk} \in J_{pt}, s < 3, k \leq 3} m_{sk} =$$

$$= 25 - (15 + 3) - 2 + 2 = 7 \Rightarrow J_{pt} = \{m_{13}, m_{34}\}.$$

Таким образом, элементы  $m_{13}$  и  $m_{34}$  включены в попутный подвоз, а инфобус, следуя на пятую остановку, перевезет дополнительно с первой, третьей и четвертой остановок  $m_{15} + m_{35} + m_{45} = 15 + 3 + 4 = 22$  пассажира. И попутно,

останавливаясь на этих остановках, перевезет  $m_{13} + m_{34} = 2 + 1 = 3$  пассажира.

По приезде на пятую остановку все пассажиры покинут салон транспортного средства. И в инфобус зайдут 20 пассажиров элемента  $m_{59}$ .

Перевезя с пятой на девятую остановку 20 пассажиров, инфобус может осуществить перевозку и на оставшемся участке маршрута. Для составления плана этой перевозки выбирается максимальный элемент  $m_{j^*j}, j > j^*$  в строке  $j^*$ . В рассматриваемом примере это  $m_{9,14} = 12$ . Он включается первым в новое множество дополнительного подвоза  $J_{at}$ .

Остальные элементы множества дополнительного подвоза выбираются в столбце  $j$  согласно совокупности требований

$$\begin{cases} m_{j^*j} + \sum_{j^* < s < j, s \in N} m_{sj} \rightarrow \max \\ m_{j^*j} + \sum_{j^* < s < j, s \in N} m_{sj} \leq V \end{cases} \quad (4)$$

Элементы выбираются итеративно: на каждой итерации необходимо найти наибольший элемент среди еще не рассмотренных из множества элементов  $m_{ij}$ ,  $j^* < i < j$ . Если элемент удовлетворяет условию (4), то он включается в  $J_{ar}$  в противном случае исключается из рассмотрения.

Таким образом, в рассматриваемом примере  $J_{ar} = \{m_{9,14}, m_{10,14}, m_{12,14}\} = \{12, 1, 11\}$ . Следовательно, множество остановок дополнительного подвоза  $S_{ar} = \{9, 10, 12\}$ .

Множество заявок попутного подвоза находится согласно условию (3) и будет включать в себя элементы  $J_{pr} = \{m_{9,10}, m_{9,12}, m_{10,12}\} = \{6, 5, 1\}$ . Если на маршруте есть еще остановки, на которые можно осуществить дополнительный подвоз, то план перевозки составляется по этой же схеме. В рассматриваемом примере таких остановок нет.

Таким образом, полученный план перевозки включает в себя использование одного инфобуса, который осуществит посадку-высадку пассажиров на остановках 1, 3, 4, 5, 9, 10, 12, 14 маршрута, обслужив заявки на перевозку элементов матрицы корреспонденций  $M_z$ :  $m_{13}, m_{15}, m_{34}, m_{35}, m_{45}, m_{59}, m_{910}, m_{912}, m_{914}, m_{1012}, m_{1014}, m_{1214}$  (рис. 8).

Все элементы матрицы, не вошедшие в план перевозки, возвращаются в базу данных и вместе с накопленными к тому моменту заявками участвуют в формировании следующей матрицы корреспонденций.

Таким образом, организация перевозки по предложенному алгоритму состоит из следующих этапов:

- определения критического элемента  $m_{i^*j^*}$ ;
- определения плана перевозки для дополнительного и попутного подвоза при подъезде к остановке  $i^*$ ;
- определения планов перевозки (их может быть несколько) для дополнительного и попутного подвоза от остановки  $j^*$  до конца маршрута после осуществления основной перевозки заявок  $m_{i^*j^*}$ .

$$M_z = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \boxed{2} & 11 & \boxed{15} & 3 & 3 & 3 & 7 & 1 & 0 & 1 & 0 & 11 \\ 0 & 0 & 3 & 1 & 14 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & \boxed{1} & \boxed{3} & 6 & 2 & 0 & 3 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{4} & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 4 & 2 & 1 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 8 & \boxed{20} & 1 & 7 & 5 & 3 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 7 & 1 & 0 & 7 & 2 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 4 & 2 & 0 & 2 & 1 & 14 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 & 2 & 7 & 6 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{6} & 10 & \boxed{5} & 4 & \boxed{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & \boxed{1} & 1 & \boxed{1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & \boxed{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Рис. 8. Заявки, вошедшие в план перевозки на матрице корреспонденций

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый тип городских общественных перевозок с использованием автоматического транспорта. Этот вид транспорта может без помех со стороны других транспортных средств перемещаться в насыщенной улично-дорожной среде. Описанная транспортная система способна функционировать самостоятельно без участия человека и за счет постоянного сбора и обработки информации адаптивно реагировать на колебания спроса на перевозки.

Рассмотрен алгоритм организации перевозок с использованием автоматического транспорта, позволяющий обеспечить уровень комфорта поездки, сопоставимый с поездкой в такси (пассажир во время поездки делает минимальное число ненужных ему промежуточных остановок либо не делает таковых вовсе). При этом за счет большего числа пассажиров эффективность поездки выше, чем у такси.

### Литература

1. Shuts V., Shviatsova A. System of urban unmanned passenger vehicle transport // ICCPT 2019: Current Problems of Transport: Proceedings of the 1st International Scientific Conference. Ternopol : TNTU, 2019. Pp. 174–184.
2. Shviatsova A., Shuts V. The Smart Urban Transport System // Research Papers Collection of Open Semantic Technologies for Intelligent System. Minsk : Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020. Pp. 349–352.
3. Shviatsova A., Shuts V. The smart urban transport system based on robotic vehicles // Штучний інтелект. 2019. № 3–4 (85–86). С. 40–49. ISSN 1561-5359.
4. Шуть В. Н., Швецова Е. В. Суперскоростная роботизированная интеллектуальная транспортная система городской перевозки пассажиров // Университет — территория опережающего развития : сборник научных статей, посвященный 80-летию Гродненского государственного университета им. Янки Купалы. Гродно : ГрГУ, 2020. С. 146–149.
5. Швецова Е. В., Глущенко Т. А. Пассажирская транспортная система для новой городской мобильности // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании,

### References

1. Shuts V., Shviatsova A. System of urban unmanned passenger vehicle transport // ICCPT 2019: Current Problems of Transport : Proceedings of the 1st International Scientific Conference. Ternopol : TNTU, 2019. Pp. 174–184.
2. Shviatsova A., Shuts V. The Smart Urban Transport System // Research Papers Collection of Open Semantic Technologies for Intelligent System. Minsk : Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020. Pp. 349–352.
3. Shviatsova A., Shuts V. The smart urban transport system based on robotic vehicles // Artificial Intelligence. 2019. No. 3–4 (85–86). Pp. 40–49. ISSN 1561-5359.
4. Shut V. N., Shvetsova E. V. Super-fast robotic intelligent transport system for urban passenger transportation [Superskorostnaya robotizirovannaya intellektual'naya transportnaya sistema gorodskoy perevozki passazhirov] // The University is a territory of advanced development : collection of scientific articles dedicated to the 80th anniversary of Yanka Kupala State University of Grodno. Grodno : YKSUG, 2020. Pp. 146–149.
5. Shvetsova E. V., Glushhenko T. A. Passenger transport system for new urban mobility [Passazhirskaya transportnaya sistema dlya novoy gorodskoy mobil'nosti] // New mathematical methods and computer

производстве и научных исследованиях : материалы XXIII республиканской научной конференции студентов и аспирантов, Гомель, 23–25 марта 2020 г. Гомель : Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, 2020. С. 181–182.

6. Жогал А. Н., Шуть В. Н., Швецова Е. В. Автоматический городской интеллектуальный пассажирский транспорт // Транспорт и инновации: вызовы будущего : материалы Международной научной конференции. Минск : Национальная библиотека Беларуси, 2019. С. 23–33.
7. Шуть В. Н., Пролиско Е. Е., Швецова Е. В. Автоматизированная система управления разделяющимся пассажирским транспортом // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2019) : доклады XVIII Международной конференции, Минск, 21 ноября 2019 г. Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2019. С. 176–180.
8. Shviatsova A., Shuts V. The cassette method principles of passengers transportation through the intelligent transportation system // Штучний інтелект. 2020. № 1. С. 14–18. ISSN 1561-5359.
9. Швецова Е. В., Шуть В. Н. Интеллектуальный транспорт с разделяющимися частями // Математические методы в технике и технологиях : сборник трудов XXXIII Международной научной конференции. Т. 3. Санкт-Петербург : Изд-во СПбПУ, 2020. С. 87–93.
10. Shviatsova A., Shuts V. The Intellectual Transport with Divisible Parts // Society 5.0: Human-Centered Society Challenges and Solutions. Springer, 2022. Pp. 265–274.
11. Shuts V., Shviatsova A. The drawing up of the motion schedule in the intelligent urban passenger transport system // Штучний інтелект. 2021. № 2. С. 104–109. ISSN 1561-5359.
12. Швецова Е. В., Шуть В. Н. О построении графика движения транспортных средств в городской пассажирской транспортной системе // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2021. № 2 (43). С. 21–24. ISSN 2227-1120.

technologies in design, production and scientific research : proceedings of the 23rd Republican scientific conference for students and postgraduate students, Gomel, March 23–25, 2020. Gomel : Francisk Skorina Gomel State University, 2020. Pp. 181–182.

6. Zhogal A. N., Shut' V. N., Shvetsova E. V. Automatic urban intelligent passenger transport [Avtomaticheskiy gorodskoy intellektual'nyy passazhirskiy transport] // Transport and innovations: challenges of the future : proceedings of the International scientific conference. Minsk : National Library of Belarus, 2019. Pp. 23–33.
7. Shut' V. N., Prolisko E. E., Shvetsova E. V. Automated control system of separating passenger transport [Avtomatizirovannaya sistema upravleniya razdelyayushhimsya passazhirskim transportom] // Development of informatization and state system of scientific and technical information (RINTI-2019) : reports of the 18th International conference, Minsk, November 21, 2019. Minsk : United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, 2019. Pp. 176–180.
8. Shviatsova A., Shuts V. The cassette method principles of passengers transportation through the intelligent transportation system // Artificial Intelligence. 2020. No. 1. Pp. 14–18. ISSN 1561-5359.
9. Shvetsova E. V., Shut' V. N. The intellectual transport with divisible parts [Intellektual'nyy transport s razdelyayushhimsya chastyami] // Mathematical methods in engineering and technology : proceedings of the 33rd International scientific conference. Vol. 3. St. Petersburg : Publishing House of SPbPU, 2020. Pp. 87–93.
10. Shviatsova A., Shuts V. The Intellectual Transport with Divisible Parts // Society 5.0: Human-Centered Society Challenges and Solutions. Springer, 2022. Pp. 265–274.
11. Shuts V., Shviatsova A. The drawing up of the motion schedule in the intelligent urban passenger transport system // Artificial Intelligence. 2021. No. 2. Pp. 104–109. ISSN 1561-5359.
12. Shvetsova E. V., Shut' V. N. On building a schedule for the movement of vehicles in the urban passenger transport system [O postroenii grafika dvizheniya transportnykh sredstv v gorodskoy passazhirskoy transportnoy sisteme] // Bulletin of BSUT: science and transport. 2021. No. 2 (43). Pp. 21–24. ISSN 2227-1120.

*Объем статьи 0,8 авторских листа*

УДК 629.4.027.4: 656.2

**Андрей Сергеевич Космодамианский**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,  
**Александр Анатольевич Пугачев**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и электротехника» Брянского государственного технического университета (БГТУ), Брянск, Россия,  
**Владимир Иванович Воробьев**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета (БГТУ), Брянск, Россия,  
**Олег Васильевич Измеров**, соискатель кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета (БГТУ), Брянск, Россия,  
**Евгений Владимирович Николаев**, старший преподаватель кафедры «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

## ПРИМЕНЕНИЕ АГРЕГАТНЫХ ТЯГОВЫХ ПРИВОДОВ ДЛЯ ЛОКОМОТИВОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ТЯГОВЫМИ СВОЙСТВАМИ

**Andrey Sergeevich Kosmodamianskiy**, DSc in Engineering, Professor, Head of Traction Rolling Stock Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,  
**Alexander Anatolyevich Pugachev**, DSc in Engineering, Associate Professor, Head of Industrial Electronic and Electrical Engineering Department, Bryansk State Technical University (BSTU), Bryansk, Russia,  
**Vladimir Ivanovich Vorobyev**, PhD in Engineering, Associate Professor, Rolling Stock of Railways Department, Bryansk State Technical University (BSTU), Bryansk, Russia,  
**Oleg Vasilyevich Izmerov**, PhD student, Rolling Stock of Railways Department, Bryansk State Technical University (BSTU), Bryansk, Russia,  
**Evgeniy Vladimirovich Nikolaev**, Senior Lecturer, Traction Rolling Stock Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

## Application of aggregate traction drives for locomotives with increased traction properties

### Аннотация

Для реализации повышенной силы тяги локомотивов рассмотрены рациональные решения тяговых приводов, имеющих агрегатную компоновку, в качестве более технологичной альтернативы интегрированным тяговым приводам зарубежных фирм. В результате анализа know-why установлено следующее: использование интегрированной схемы обусловлено задачей разработки привода для локомотивов с разной шириной колеи; переход на агрегатную компоновку требует увеличения осевого габарита тягового привода, создания упруго-компенсирующей муфты, работоспособной при частоте вращения до  $4000 \text{ мин}^{-1}$ , и увеличения числа подшипников в приводе. Доказана возможность увеличить габариты привода локомотива колеи 1520 мм для размещения муфты с предельным диаметром 570 мм и осевым габаритом 200 мм, а также техническая возможность создания в этих габаритах работоспособной упруго-компенсирующей муфты с резиновыми упругими элементами по условиям сцепления резины с металлом. Предложены конструктивные схемы агрегатного тягового привода, позволяющие сократить в нем число подшипников, а также агрегатного тягового привода с упругим опиранием на ось, что дает возможность использовать такой привод для пассажирских локомотивов с колесами диаметром 1220–1250 мм.

**Ключевые слова:** тяговый привод, подвижной состав железных дорог, технология машиностроения, теория конструирования.

### Abstract

In order to implement the increased traction power of locomotives, rational solutions of traction drives with an aggregate layout are considered as a more technologically advanced alternative to integrated traction drives of foreign companies. As a result of the know-why analysis, the following was established: the use of an integrated circuit is induced by the objective of developing a drive for locomotives with different track gauge; the transition to an aggregate layout requires an increase in the axial dimension of a traction drive, the creation of an elastic-compensating coupling, operable at a rotational speed of up to  $4000 \text{ min}^{-1}$ , and an increase in the number of bearings in the drive. It is grounded that it is possible to increase the dimensions of the locomotive's 1520 mm gauge drive to equip it with a coupling joint of a maximum diameter of 570 mm and an axial dimension of 200 mm, as well as the technical possibility of creating a workable elastic-compensating coupling joint with rubber elastic elements in these dimensions according to the conditions of adhesion of rubber with metal. The structural layouts of an aggregate traction drive are proposed, allowing to reduce the number of bearings in it, as well as an aggregate traction drive with elastic support on the axle, which makes it possible to use such a drive for passenger locomotives with the wheels of 1220–1250 mm diameter.

**Keywords:** traction drive, railway rolling stock, mechanical engineering technology, design theory.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-41-48

## ВВЕДЕНИЕ

**П**овышение тяговых свойств и осевой мощности отечественных локомотивов с асинхронными тяговыми электродвигателями (ТЭД), созданных в последние 10–15 лет, достигалось, как правило, за счет использования тяговых приводов интегрированной схемы, разработанных зарубежными производителями. В частности, к таковым относятся приводы эксплуатируемых на российских железных дорогах электровозов 2ЭС7, 2ЭС10 (основаны на технических решениях фирмы «Сименс», Германия) и ЭП20 (основан на технических решениях фирмы «Альстом», Франция), которые содержали узлы зарубежного производства.

В работах [1, 2] были рассмотрены технологические преимущества тяговых приводов локомотивов агрегатной схемы перед приводами интегрированной схемы.

Как было отмечено в [3], О. В. Измеров предложил относить тяговый привод к типу интегрированных при наличии одного из двух следующих признаков:

в приводе имеется узел, который выполняет функции нескольких основных узлов привода;

один из основных узлов привода не может выполнять свои функции без сборки с другим узлом.

К агрегатным тяговым, на наш взгляд, следует относить приводы, имеющие несколько узлов с одним и тем же типом опирания, которые сохраняют работоспособность отдельно друг от друга и связаны друг с другом подвижными соединениями.

В условиях импортозамещения в связи с технологическими сложностями изготовления узлов, поступавших из-за рубежа, на электровозе 2ЭС8 отечественный производитель отказался от интегрированного тягового привода и вернулся к двусторонней тяговой передаче, аналогичной той, что применяется на электровозах с коллекторными ТЭД (2ЭС6 и т. п.).

Возврат к двусторонней тяговой передаче в данных условиях означает шаг назад по сравнению с интегральным приводом. Появившиеся в СМИ утверждения о том, что двусторонняя тяговая передача якобы обеспечивает более равномерное распределение усилий по колесам, не соответствуют результатам ранее проведенных исследований [4], в ходе которых была зарегистрирована неравномерность распределения передачи крутящего момента по ветвям передачи в 1,57 раза в режиме тяги. С другой стороны, как показали результаты испытаний тепловоза с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и осевым редуктором, в которых участвовали авторы статьи, при одностороннем приводе распределение моментов по колесам зависит от разницы диаметров колес в точках контакта с рельсами, т. е. от расположения локомотива в колее (на чем и основано центрирование экипажа в колее при конической форме бандажей). В частности, при общем увеличении силы тяги в движении ее распределение по колесам выравнивается за счет их упругого скольжения по рельсам и соответственно зависит от мгновенной величины упругого скольжения. При этом остаются такие недостатки двустороннего привода электровозов, как консольное расположение ведущих колес, приводящее к неравномерности нагрузки по ширине венца, и возможность повреждения несущих кожухов передач наледями на пути. Наконец, снижение ча-

стоты вращения ТЭД требует увеличения его массы и, следовательно, необрессоренной массы, приходящейся на одну ось, что препятствует повышению нагрузки на ось из-за увеличения воздействия на путь.

Интегральный тяговый привод также планировалось использовать на перспективном проектируемом тепловозе с повышенной нагрузкой на ось и диаметром колес 1250 мм [2]. Однако из-за невозможности применения редуктора фирмы Wiko (Чехия) этот проект пока не реализован.

Таким образом, дальнейшее повышение тяговых свойств локомотивов приводит к необходимости использовать тяговые приводы агрегатной схемы. Это обусловлено тем, что сегодня копирование западных образцов связано со значительными трудностями, а возврат к конструктивным схемам, которые уже в 1980-х гг. рассматривались как бесперспективные, ограничивает возможности увеличения нагрузки на ось и тягового усилия.

Поскольку задача создания агрегатного тягового привода пассажирского электровоза с асинхронными ТЭД может быть решена за счет использования привода с опорно-рамным подвешиванием ТЭД и осевым редуктором [5], основная проблема на данный момент — поиск рациональных решений агрегатного привода для грузовых локомотивов. Настоящая статья представляет собой попытку решить эту проблему.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проанализируем интегрированную схему тягового привода методом know-why [6].

Ранее в [3] (часть 2) авторы предложили выделить для семейства редукторных тяговых приводов с частичным обрессориванием масс привода четыре типа компоновки:

простую, когда функциональные узлы явно не выделены, как, например, у двустороннего тягового привода электровоза 2ЭС6, в котором зубчатые колеса тяговой передачи просто закреплены на валу ТЭД и оси колесной пары;

переходную, как, например, у тягового привода опытных электровозов 2ЭС5, в котором появляются элементы корпуса осевого редуктора;

интегрированную, в которой элементы привода можно определить в явном виде (например, осевой редуктор), однако они не могут выполнять свои функции отдельно;

агрегатную, в которой функциональные узлы могут выполнять свои функции отдельно.

Согласно [7], развитие конструктивной схемы изделия осуществляется проектировщиком в зависимости от изменения потребностей — путем разрешения противоречивых требований к изделию. Основной потребностью, которая привела зарубежные фирмы к переходу от простой компоновки к интегрированной, стала необходимость создания единой конструкции колесно-моторного блока для дорог разной ширины колеи, что потребовало снижения габаритов и массы ТЭД. Это можно было достичь за счет повышения максимальной частоты вращения тягового электродвигателя.

В тяговом приводе простой схемы малое зубчатое колесо размещено на конце вала ТЭД, а функцию опор шестерни выполняют роторные подшипники тягового электродвигателя. По-

вышению частоты вращения ТЭД в ней препятствовали следующие противоречивые требования:

при уменьшении диаметра ведущего зубчатого колеса, вызванном повышением передаточного числа из-за невозможности сделать большим диаметр ведомого зубчатого колеса, длина посадочного места на вал ТЭД должна быть увеличена, чтобы обеспечить прочность соединения с гарантированным натягом, и одновременно не должна быть увеличена из-за ограничений по габаритам со стороны кожуха редуктора и роторного подшипника ТЭД;

диаметр роторного подшипника со стороны зубчатой передачи должен быть уменьшен для повышения предельной частоты вращения ротора и в то же время не должен быть уменьшен из-за снижения нагрузочной способности;

диаметр хвостовика вала ТЭД должен быть уменьшен вследствие уменьшения диаметра ведущей шестерни и одновременно не должен быть уменьшен по требованиям к изгибной прочности вала при воздействии поперечной нагрузки от зубьев передачи в условиях консольного расположения малого зубчатого колеса.

Расположение малого зубчатого колеса между роторными подшипниками, как это, например, сделано в приводе по концепции IGA, снимает первое и третье из перечисленных противоречий, но не позволяет увеличить срок службы роторных подшипников по сравнению с простой схемой компоновки. Использованию схемы с опорно-рамным подвешиванием ТЭД с торсионным валом в полем якоре и осевым редуктором для увеличения срока службы подшипников при повышении максимальной частоты вращения ротора более  $3000 \text{ мин}^{-1}$  препятствует необходимость в увеличении диаметра вала ротора и внутреннего диаметра роторных подшипников, что, в свою очередь, не позволяет применять подшипники требуемой быстроходности.

Рассмотрим, как можно разрешить эти противоречия в интегрированном и агрегатном приводах (рис. 1а, б).

В тяговых приводах типа GEALAIF (см. рис. 1а), чтобы разрешить все три противоречивых требования, малое зубчатое колесо размещено на двух подшипниковых опорах, а ротор ТЭД с одной стороны опирается на подшипник, а с другой — на быстроходный вал редуктора через дисковую металлическую муфту (мембранную муфту). Таким образом создается статическая неопределенность быстроходной части привода. Кроме того, чтобы обеспечить устойчивость вращения ротора при высоких оборотах, мембранная муфта должна иметь максимальную жесткость в поперечном направлении, а значит, необходимо минимизировать угловую несоосность ротора ТЭД и малой шестерни. Это достигается за счет того, что корпус редуктора и корпус ТЭД жестко связаны, причем центрирование корпуса редуктора относительно ТЭД в радиальном направлении обеспечивается кольцевым выступом на фланце, который входит в отверстие корпуса ТЭД. Таким образом, радиальное усилие, действующее на вал малого зубчатого колеса, раскладывается на две подшипниковые опоры, одна из которых тоже воспринимает вес ротора ТЭД и силу инерции при воздействии на ротор вертикальных и продольных горизонтальных ускорений во время прохождения неровностей пути.

Чтобы обеспечить статическую определенность осевых подшипниковых опор при жесткой связи корпусов ТЭД и редуктора, в приводе используются два осевых подшипника: роликовый, размещенный на нижней половине разъемного корпуса редуктора, и шариковый, расположенный на противоположном конце корпуса ТЭД. Шариковый подшипник воспринимает осевые усилия, при этом из-за уменьшения централи, вызванного уменьшением диаметра малого зубчатого колеса за счет увеличения передаточного отношения, гнездо подшипника углублено в корпус ТЭД.

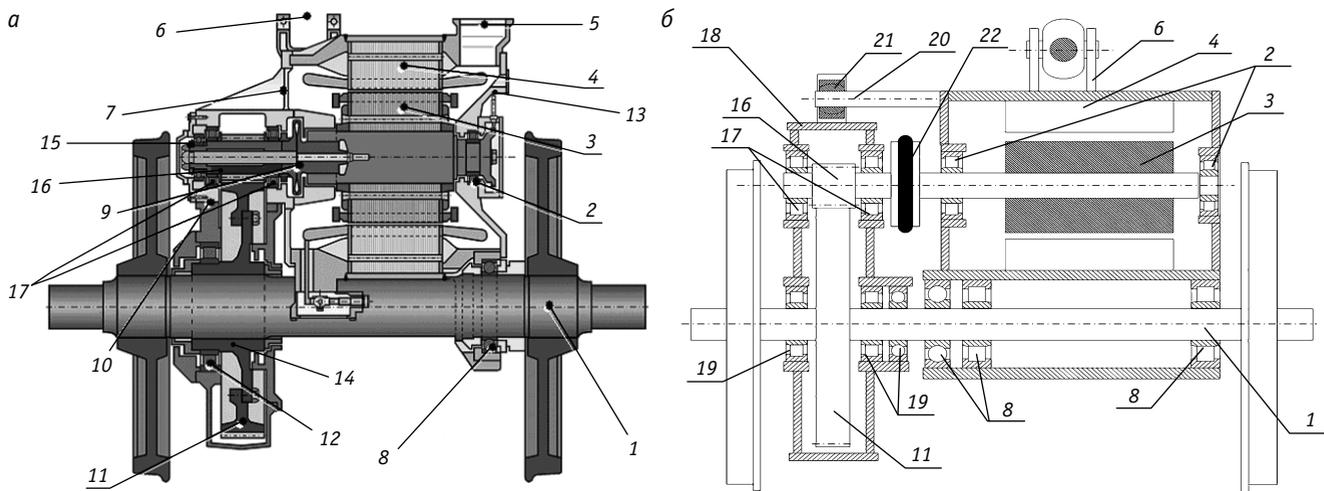
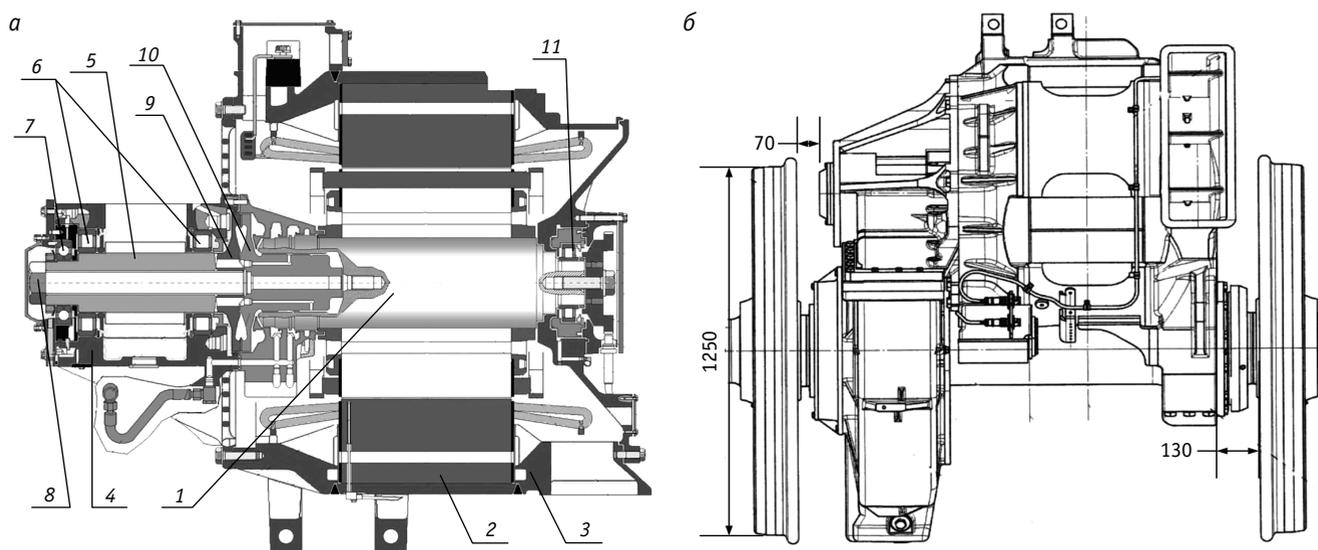


Рис. 1. Схемы интегрированного (а) и агрегатного (б) тягового привода:

1 — ось колесной пары; 2 — подшипник двигателя; 3 — ротор двигателя; 4 — статор; 5 — патрубок забора охлаждающего воздуха; 6 — кронштейн подвески двигателя; 7 — каналы выхода воздуха; 8 — моторно-осевой подшипник; 9 — мембранная муфта; 10 — соединение редуктора; 11 — венец зубчатого колеса; 12 — моторно-осевой подшипник (сторона редуктора); 13 — задний подшипниковый щит; 14 — ступица зубчатого колеса; 15 — 4-точечный подшипник; 16 — шестерня; 17 — цилиндрический подшипник; 18 — корпус осевого редуктора; 19 — подшипники осевого редуктора; 20 — кронштейн; 21 — подвижное шарнирное соединение; 22 — упруго-компенсационная муфта



**Рис. 2. Тяговый привод электровоза 2ЭС10:**

*а* — узел ТЭД в сборе с редуктором; *б* — колесно-моторный блок на тележке; 1 — ротор ТЭД; 2 — статор ТЭД; 3 — корпус ТЭД; 4 — корпус редуктора; 5 — малое зубчатое колесо (вал-шестерня); 6 — радиальные подшипники вала-шестерни; 7 — упорный шариковый подшипник; 8 — болт крепления диафрагменной муфты; 9, 10 — полу муфты диафрагменной муфты; 11 — роторный подшипник

Жесткая связь между редуктором и ТЭД, в свою очередь, создает следующие проблемы:

необходимость в высокой точности обработки поверхностей фланца редуктора и ТЭД, а также гнезд под подшипники на редукторе и ТЭД, чтобы исключить расцентровку, поскольку должна быть обеспечена взаимозаменяемость корпусов ТЭД и корпусов редуктора;

изгиб оси колесной пары, приводящий к перекосу зубьев в передаче;

значительное усложнение сборки привода, так как правильность сборки редуктора и ТЭД проверить раздельно невозможно.

Для решения этих проблем авторами предложен привод агрегатного типа (см. рис. 1б), в котором жесткая связь ТЭД и редуктора заменена на шарнирную, а валы ТЭД и осевого редуктора связаны упруго-компенсирующей муфтой. Поскольку ТЭД также опирается на ось колесной пары, поперечная и угловая расцентровка валов ТЭД и осевого редуктора определяется погрешностями изготовления деталей и монтажа, что существенно ниже расцентровок в приводе с опорно-рамным ТЭД и осевым редуктором, возникающих при перемещениях над-рессорного строения относительно пути. Уменьшение расцентровок позволяет применить одинарную упругую муфту, которая тоже снижает динамические моменты в приводе при проезде неровностей пути. Изготовление узлов осевого редуктора уже освоено в России, например, для тягового привода электровоза ЭП1 производства Новочеркасского электровозостроительного завода (НЭВЗ). На конструкцию привода авторами получен патент [8].

С другой стороны, агрегатная схема привода, помимо явных технологических преимуществ, создает следующие новые проблемы. Во-первых, необходимость размещения упругой муфты требует увеличения осевых габаритов привода в месте

размещения быстроходных валов. Во-вторых, при агрегатной схеме увеличивается общее количество подшипников качения (на рис. 1 — с 5 до 10). В-третьих, необходимость создания упругой муфты с большим ресурсом, способной работать при частоте оборотов до  $4000 \text{ мин}^{-1}$ . Рассмотрим подробнее указанные проблемы и пути их решения.

#### **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИВОДА АГРЕГАТНОЙ СХЕМЫ**

В приводе интегрированного типа осевые габариты редуктора в месте размещения увеличены вследствие наличия узла упорного подшипника и болта крепления полу муфты зубчатой муфты (рис. 2а). Необходимость упорного подшипника обусловлена применением в тяговой передаче косых зубьев с углом наклона  $4^\circ$ , вызывающих осевые усилия при передаче крутящего момента. Столь малый угол наклона в основном позволяет снизить динамические нагрузки при пересопрежении зубьев.

В осевом редукторе отечественного электровоза ЭП1 применяются шевронные зубчатые колеса. Поскольку их осевые усилия на поверхностях зубьев направлены встречно и взаимно компенсируются, используются два радиальных роликовых подшипника, в которых осевые усилия воспринимаются буртами. Недостатком такой конструкции являются составные шевронные колеса с двумя венцами со встречно направленными зубьями, что уменьшает суммарную ширину зубьев (для интегрированного привода 2ЭС10 — около 170 мм).

Еще в 1980-х гг. во ВНИКТИ рекомендовали применять в осевых редукторах локомотивов арочные зубчатые колеса, не требующие составного венца. В то время основным препятствием для реализации этого предложения в серийных машинах была необходимость использовать технологию американской фирмы Gleason. Однако сегодня разработаны и внедрены отечественные технологии производства арочных зубчатых колес, в которых зу-

бонарезание выполняется на многих видах четырехкоординатных станков с ЧПУ, причем одна из координат является круговой [9–11]. Это позволяет исключить из конструкции редуктора упорный подшипник на ведущем валу, а также болт крепления муфты, что дает возможность сократить ширину редуктора в месте расположения ведущего вала приблизительно на 100 мм.

Расстояние от колеса колесной пары до крышки ведущего вала осевого редуктора составляет приблизительно 70 мм (рис. 2б), от колеса до ТЭД — примерно 130 мм.

В существующих тяговых приводах с осевыми редукторами зазор между колесом колесной пары и осевым редуктором принимается равным 20–50 мм. Таким образом, при уменьшении зазора и отказа от упорного подшипника редуктора осевой габарит пространства для размещения одинарной упругой муфты может составить 200–250 мм. Следует отметить, что у построенных отечественных тепловозов с опорно-рамным ТЭД и осевым редуктором осевой габарит для размещения муфты дискового типа (расстояние между крышкой подшипникового узла осевого редуктора и корпусом ТЭД) не превышает 150 мм, причем с учетом возможности продольного перемещения ТЭД относительно муфты на расстояние  $\pm 20$ –25 мм.

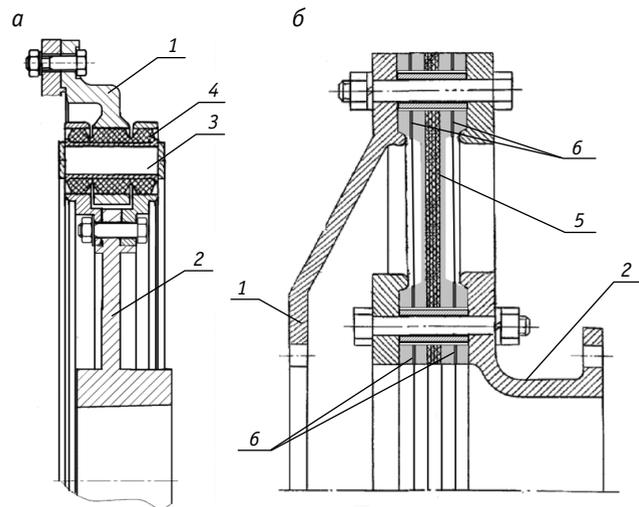
Примерный допустимый радиальный габарит муфты определим, исходя из аналога муфты для тепловоза с диаметром колес 1250 мм и осевым редуктором, для которого был принят диаметр муфты, равный  $D_3 = 640$  мм [12]. У аналога межцентровое расстояние зубчатой передачи равно 595 мм, в приводе электровоза 2ЭС10 — 560 мм, таким образом, для агрегатного привода с тем же передаточным отношением, что и у 2ЭС10, в первом приближении можно принять, что наружный диаметр муфты не должен превышать 570 мм.

Крутящий момент в продолжительном режиме ТЭД типа 1ТВ 2822 равен  $M_\infty = 6,81$  кНм, резинокордная муфта аналога рассчитана на работу с ТЭД ЭД126АУХЛ1 в модификации с  $M_\infty = 8,74$  кНм (по данным [12], максимальная кратковременная нагрузка — до 30 кНм). При этом передаваемый крутящий момент ограничивается сцеплением резины с металлом по внутреннему прижимному кольцу, имеющему диаметр всего  $d_1 = 420$  мм, а внутренний диаметр наружного прижимного кольца, равный у аналога 540 мм, в данном случае уменьшится до  $D_1 = 470$  мм.

Срок службы муфты будет определяться ее деформациями под воздействием угловых перекосов, радиальной несоосности валов и динамической составляющей крутящего момента. Угловые перекосы и радиальная несоосность в агрегатном приводе незначительны, динамическая составляющая крутящего момента при той же крутильной жесткости валопроводов будет ниже. Это обусловлено тем, что в приводе с опорой ТЭД на ось точка подвеса ТЭД к раме тележки расположена дальше от оси ротора, чем точка осевого подвеса редуктора от оси малого зубчатого колеса осевого редуктора в приводе с опорно-рамным ТЭД. Поскольку в агрегатном приводе внутренний фланец муфты расположен на валу ТЭД, а упругие элементы закреплены по периферии на фланце редуктора, увеличение частоты вращения до  $4000 \text{ мин}^{-1}$  не способно привести к разрушению дисковой муфты, рассмотренной в [12], в отличие от торобразных резинокордных муфт.

Из изложенного следует, что принципиально создание одинарной упруго-компенсирующей муфты агрегатного привода в габаритах радиусом 570 и длиной 200 мм можно считать доказанным. При этом следует отметить, что муфта не должна полностью повторять предложенную в [12] конструкцию дисковой резинокордной муфты по причине высокой радиальной жесткости последней. Радиальная жесткость муфты конструкции ВНИКТИ с перекрещивающимися слоями корда составляет 21 кН/мм [13], а муфты конструкции НПП «Прогресс» с кордными нитями под углом  $15^\circ$  к радиусу — 18–21 кН/мм [14].

Авторами предложены конструкции резинометаллической и резинокордной муфт (рис. 3) для агрегатного привода. В резинометаллической муфте (рис. 3а), чтобы снизить радиальную жесткость, втулки выполнены двойными. В результате при поперечном смещении валов друг относительно друга каждый из резинометаллических элементов испытывает деформацию сжатия, равную половине поперечного смещения, что увеличивает срок службы упругого элемента. В резинокордной муфте (рис. 3б) в кольцевых выступах размещена металлическая арматура. Это позволяет увеличить толщину выступов и возможность поперечной деформации валов при той же жесткости на сжатие (и соответственно тем же усилием прижатия резины к фланцам и силой трения между резиной и фланцами). На предложенную конструкцию резинометаллической муфты получен патент на полезную модель [15], на конструкцию резинокордной — оформлена заявка на получение патента.



**Рис. 3. Схемы вариантов резинометаллической (а) и резинокордной (б) муфт для агрегатного привода:**  
 1, 2 — фланцы; 3 — втулка; 4 — резиновый элемент;  
 5 — резинокордная муфта; 6 — плоская арматура

Увеличение количества подшипников в агрегатном приводе по сравнению с интегрированным само по себе не характеризует его эксплуатационные свойства, кроме большего числа узлов, подлежащих диагностике. В рассматриваемом случае прежде всего важны возможность выбора подшипника отечественного производства и его замены при модернизации или срыве поставок. В приводе агрегатной схемы нагруженность

осевого радиального подшипника снижается более чем в два раза при аналогичных габаритах размещения, что упрощает поиск требуемого изделия. Таким образом, в условиях импортозамещения большее число подшипников при агрегатной схеме является скорее преимуществом, чем недостатком.

Вместе с тем авторами предложены варианты агрегатного тягового привода, в которых количество осевых подшипников может быть снижено (рис. 4). В тяговом приводе, изображенном на рис. 4а, ТЭД опирается не непосредственно на ось колесной пары, а на неподвижную трубу, которая, в свою очередь, одним концом опирается на подшипник, установленный на колесном центре, а другим — на подшипник осевого редуктора через сферическую опору, размещенную на корпусе редуктора в месте расположения подшипника. Недостатком такого решения является неравномерное распределение нагрузки на осевые подшипники редуктора. Этот недостаток устранен в конструкции (рис. 4б), где ТЭД опирается на корпус осевого редуктора через два одинаковых шарнирных соединения, технологичность изготовления которых будет несколько выше, чем сферической опоры на подшипнике редуктора в варианте, представленном на рис. 4а. Однако в данном случае возможная величина расцентровки валов ТЭД и осевого редуктора оказывается несколько выше, чем у варианта на рис. 4а.

Размеры подшипников можно увеличить, если разместить последние на месте ступицы большого зубчатого колеса, как это показано на рис. 4в. Следует отметить, что сферическая опора на корпусе подшипникового узла редуктора при этом должна иметь подвижность также в осевом направлении, а вес корпуса редуктора будет больше, поскольку односторонняя опора вызывает необходимость повышать изгибную жесткость корпуса.

Необрессоренная масса привода с высокооборотным асинхронным ТЭД электровоза 2ЭС10 составляет порядка 4 т для одной оси, что близко к величине необрессоренной массы применявшихся на наших дорогах электровозов серии ЧС2 дешегого производства, имеющих конструкционную скорость 160 км/ч (3,85 т). Это означает, что указанный при-

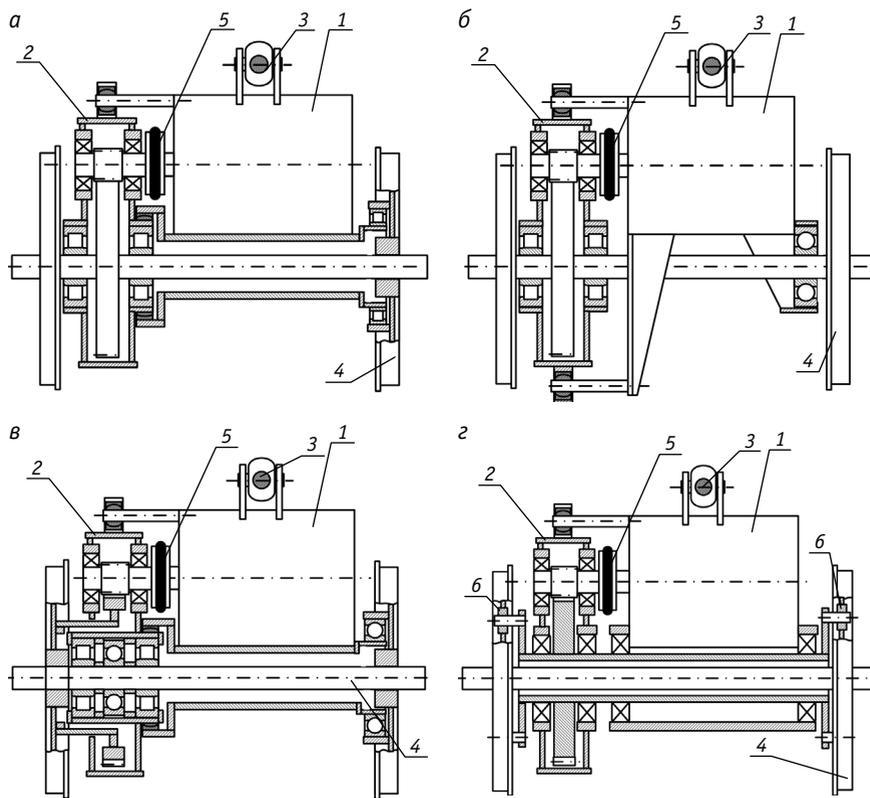


Рис. 4. Схемы вариантов агрегатного тягового привода с опиранием ТЭД на осевой редуктор: а — с опорой ТЭД через неподвижную трубу; б — с опорой ТЭД через два шарнира; в — с креплением большого зубчатого венца на колесе; 2 — с упругим опиранием; 1 — ТЭД; 2 — осевой редуктор; 3 — подвеска; 4 — колесная пара; 5 — упругая муфта; 6 — упругие элементы

вод в принципе может быть использован для пассажирских локомотивов с диаметром колеса 1220–1250 мм. Однако привод интегральной схемы не имеет упругого звена в валопроводах, что ведет к высоким динамическим нагрузкам при прохождении неровностей пути. От этого недостатка свободен привод агрегатной схемы. Причем благодаря увеличению диаметра малого зубчатого колеса при меньшем передаточном числе привод может быть выполнен с упругим опиранием на колесную пару (рис. 4г).

Рассматриваемый привод отличается небольшой массой осевого редуктора (около 1000 кг) и ТЭД (около 3000 кг). Как показали исследования экспериментальных образцов опорно-центровых приводов тепловозов с диаметром колеса 1050 мм, имеющих сходную величину масс необрессоренных частей [13], при рациональной конструкции упругих элементов удавалось достичь снижения вертикальных ускорений ТЭД в 1,5 раза.

При этом необходимо учитывать, что частота собственных колебаний ТЭД и редуктора на упругой связи с колесной парой должна быть выше оборотной частоты вращения колес ( $\Omega$ ), равной

$$n_{\max} = \frac{v_{\max}}{3,6\pi D_{\kappa}},$$

где  $v_{\max}$  — максимальная скорость движения пассажирского электровоза,  $v_{\max} = 160$  км/ч;

$D_{\kappa}$  — диаметр колеса,  $D_{\kappa} = 1,25$  м.

При указанных значениях  $n_{\max} = 11$  Гц. Чтобы предотвратить резонансное усиление колебаний, частота собственных колебаний ТЭД и редуктора должна быть не менее чем в 1,4 раза выше, т.е. не менее 15 Гц. Поскольку, согласно [16, рис. 6], для тягового привода локомотива с близкой величиной необрессоренной массы (4,2 т) частота колебаний неподдресоренных масс на упругом основании пути составляет 28–36 Гц,

то частота собственных колебаний ТЭД и редуктора будет примерно в два раза ниже. Таким образом, при упругом опирании привода с высокооборотным ТЭД на ось принципиально возможен выбор параметров динамической системы, обеспечивающей удовлетворительные свойства привода при прохождении неровностей пути. Экономическая целесообразность применения такого привода для пассажирских локомотивов может быть установлена в ходе более детальной проработки конструкции.

На приводы по вариантам, представленным на рис. 3а и рис. 4б, авторами получены патенты на полезную модель [17, 18], на приводы по вариантам рис. 3б и рис. 4а поданы заявки на патенты.

## Выводы

1. Доказано, что применение двустороннего тягового привода для грузовых электровозов с асинхронными ТЭД, являясь вынужденной мерой в условиях импортозамещения, не обеспечивает дальнейшего повышения эксплуатационных свойств привода по сравнению с приводами интегрированной схемы и ограничивает возможность увеличения силы тяги. Основным препятствием к внедрению тяговых приводов агрегатной схемы, которые принципиально позволяют сочетать высокую надежность и долговечность привода с технологической простотой изготовления, является недостаточная изученность проблем, связанных с внедрением агрегатных тяговых приводов.

2. Как показал анализ конструкции интегрированного тягового привода методами know-why, этот вид компоновки яв-

ляется вынужденным в условиях необходимости поставок подвижного состава для железных дорог разной ширины колеи, что создает дополнительные ограничения на габариты привода. При переходе на агрегатную компоновку привода потребуется увеличить его осевые габариты для размещения упругой муфты, разработать упругую муфту, компенсирующую погрешности монтажа узлов и надежно работающую при максимальной частоте оборотов до 4000 мин<sup>-1</sup>, и увеличить число подшипников качения в приводе.

3. Доказана возможность увеличения осевых габаритов для агрегатного тягового привода, использующего ТЭД, аналогичный по характеристикам применяемому на электровозе 2ЭС10, и определено, что габариты упругой муфты будут ограничены диаметром 570 и длиной 200 мм. Путем анализа существующей конструкции резинокордной муфты установлена принципиальная возможность достижения требуемой нагрузочной способности муфты в данных габаритах, при этом муфта не должна повторять конструкцию существующей из-за высокой радиальной жесткости последней.

4. Предложены конструктивные схемы агрегатного тягового привода, позволяющие сократить число подшипников в приводе, а также агрегатного тягового привода с упругим опиранием на ось, что позволит использовать указанный привод для пассажирских локомотивов с диаметром колес 1220–1250 мм.

5. На предложенные конструктивные решения получены четыре патента на полезные модели и поданы три заявки на патенты.

## Литература

1. Воробьев В. И., Стриженко А. Г., Измеров О. В. Поиск новых конструктивных схем редукторного и безредукторного тягового привода локомотива с частичным обрессориванием масс // Вестник БГТУ. 2016. № 1 (49). С. 16–21. ISSN 1999-8775.
2. Воробьев В. И., Измеров О. В. Агрегатная компоновка тягового привода для тепловоза с повышенной нагрузкой на ось // Совершенствование транспортных машин : сборник научных трудов ; под ред. В. В. Рогалева, В. И. Воробьева. Брянск : Изд-во БГТУ, 2019. С. 42–46.
3. Применение классификаций для поиска новых технических решений : монография / В. И. Воробьев, С. Н. Злобин, О. В. Измеров [и др.]. Орел : ОГУ им. И. С. Тургенева, 2022. 189 с.
4. Исследование динамических нагрузок в тяговой передаче электровоза ВЛ80к : отчет / ВЭЛНИИ. Новочеркасск, 1967. 74 с. № ДП-19-67.
5. Анализ по модернизации тягового привода электровоза ЭП10 / В. И. Воробьев, О. В. Измеров, М. А. Маслов, С. О. Копылов // Повышение эффективности транспортных машин : сборник научных трудов ; под ред. В. И. Воробьева, В. В. Рогалева. Брянск : Изд-во: БГТУ, 2017. С. 48–56.
6. Техническая инновационика. Проектирование конкурентоспособных машин : монография / Под ред. А. С. Космодамианского. Орел : Госуниверситет–УНПК, 2013. 415 с.
7. Кибернетические аспекты методов синтеза электромеханических систем : монография / Под ред. А. С. Космодамианского. Орел : Госуниверситет–УНПК, 2015. 225 с.

## References

1. Vorobyev V. I., Strizhenok A. G., Izmerov O. V. Search of new design schemes of geared and direct-drive traction mechanism of locomotive with mass partial springing [Poisk novykh konstruktivnykh skhem reduktornogo i bezreduktornogo tyagovogo privoda lokomotiva s chastichnym obressorivaniem mass] // Bulletin of Bryansk State Technical University. 2016. No. 1 (49). Pp. 16–21. ISSN 1999-8775.
2. Vorobyev V. I., Izmerov O. V. Aggregate layout of the traction drive for a diesel locomotive with an increased axle load [Агрегатная компоновка тягового привода для тепловоза с повышенной нагрузкой на ось] // Improving transport vehicles : collection of scientific papers ; ed. by V. V. Rogalev, V. I. Vorobyev. Bryansk : Publishing House of BSTU, 2019. Pp. 42–46.
3. Application of classifications for searching the new technical solutions [Применение классификаций для поиска новых технических решений] : monograph / V. I. Vorobyev, S. N. Zlobin, O. V. Izmerov [et al.]. Orel : Orel State University named after I. S. Turgenyev, 2022. 189 p.
4. Studying the dynamic loads in a traction transmission of the VL80k electric locomotive [Исследование динамических нагрузок в тяговой передаче электровоза ВЛ80к] : report / All-Russian Research and Development Institute of Electric Locomotive Engineering. Novocherkassk, 1967. 74 p. No. DP-19-67.
5. Analysis for modernization of the traction drive of the EP10 electric locomotive [Анализ по модернизации тягового привода электровоза ЭП10] / V. I. Vorobyev, O. V. Izmerov, M. A. Maslov, S. O. Kopylov // Improving the efficiency of transport vehicles : a collection of scientific papers ; ed. by V. I. Vorobyev, V. V. Rogalev. Bryansk : Publishing House of BSTU, 2017. Pp. 48–56.
6. Technical innovativeness. Designing competitive machines [Техническая инновационика. Проектирование конкурентоспособных машин] : monograph / Ed. by A. S. Kosmodamianskiy. Orel : State University — Educational-Research and Production Complex, 2013. 415 p.

8. Тяговый привод локомотива / В. И. Воробьев, О. В. Измеров, В. Г. Новиков [и др.] : патент на полезную модель 164797 Российская Федерация. № 2015144911/11 ; заявл. 19.10.2015 ; опубл. 20.09.2016, Бюл. № 26.
9. Эвольвентные арочные передачи. Инновационная технология высокопроизводительного изготовления / А. Н. Виноградов, А. П. Давыдов, С. И. Липатов [и др.] // Деловая слава России. 2011. № 3 (31). С. 42–45.
10. Виноградов А. Н., Липатов С. И., Марголит Р. Б. Точность нарезания колес с арочными зубьями // Технология машиностроения. 2013. № 9. С. 23–27. ISSN 1562-322X.
11. Бочкова Д. Е., Бобков М. Н., Золотова С. А. Обработка круговых зубьев цилиндрических колес с локализованной зоной касания // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. Вып. 5. С. 344–349. ISSN 2071-6168.
12. Резинокордная муфта тягового привода тепловоза 2ТЭ121 / В. И. Власов, Е. М. Богопольский, Ю. И. Соколенко, О. М. Студенцов // Результаты испытаний тепловоза 2ТЭ121 : труды ВНИТИ. 1985. Вып. 62. С. 131–135.
13. Повышение надежности экипажной части тепловозов : монография / А. И. Беляев, Б. Б. Бунин, С. М. Голубятников [и др.] ; под ред. Л. К. Добрынина. Москва : Транспорт, 1984. 248 с.
14. О ресурсе резинокордных элементов муфты тягового привода пассажирского электровоза ЭП1 / Ю. Н. Соколов, П. М. Суворовцев, В. Е. Дегтярев, А. С. Пономарев // Экспериментальные исследования и конструкторские разработки по обеспечению работоспособности, повышению безотказности и эффективности подвижного состава и его узлов : Вестник ВНИКТИ. 2011. Вып. 93. С. 40–51.
15. Компенсационная муфта тягового привода локомотива / В. И. Воробьев, Д. Я. Антипин, О. В. Измеров [и др.] : патент на полезную модель 172577 Российская Федерация. № 2017106452 ; заявл. 27.02.2017 ; опубл. 13.07.2017, Бюл. № 20.
16. Динамические нагрузки в тяговом приводе тепловоза 2ТЭ121 / А. Т. Литвинов, Е. П. Акишин, Ф. Г. Вербер [и др.] // Результаты испытаний тепловоза 2ТЭ121 : труды ВНИТИ. 1985. Вып. 62. С. 119–130.
17. Тяговый привод локомотива / В. И. Воробьев, Д. Я. Антипин, А. С. Космодамианский [и др.] : патент на полезную модель 189364 Российская Федерация. № 2017137866 ; заявл. 30.10.2017 ; опубл. 21.05.2019, Бюл. № 15.
18. Тяговый привод локомотива / В. И. Воробьев, Д. Я. Антипин, О. В. Измеров [и др.] : патент на полезную модель 206748 Российская Федерация. № 2021103327 ; заявл. 10.02.2021 ; опубл. 24.09.2021, Бюл. № 27.
7. Cybernetic aspects of synthesis methods of electromechanical systems [Kiberneticheskie aspekty metodov sinteza elektromekhanicheskikh sistem] : monograph / Ed. by A. S. Kosmodamianskiy. Orel : State University — Educational-Research and Production Complex, 2015. 225 p.
8. Locomotive traction drive [Tyagovyy privod lokomotiva] / V. I. Vorobyev, O. V. Izmerov, V. G. Novikov [et al.] : patent for utility model 164797 Russian Federation. No. 2015144911/11 ; filed 19.10.2015 ; publ. 20.09.2016, Bulletin No. 26.
9. Involute arched gears. Innovative technology of high-performance manufacturing [Evol'ventnye arochnye peredachi. Innovatsionnaya tekhnologiya vysokoproizvoditel'nogo izgotovleniya] / A. N. Vinogradov, A. P. Davydov, S. I. Lipatov [et al.] // Business glory of Russia. 2011. No. 3 (31). Pp. 42–45.
10. Vinogradov A. N., Lipatov S. I., Margolit R. B. Accuracy of arc-gear cutting [Tochnost' narezaniya koles s arochnymi zub'yami] // Tekhnologiya Mashinostroeniya. 2013. No. 9. Pp. 23–27. ISSN 1562-322X.
11. Bochkova D. E., Bobkov M. N., Zolotova S. A. Processing of circular teeth of a pair of cylindrical wheels with localized touch zone [Obработка krugovykh zub'ev tsilindricheskikh koles s lokalizovannoy zony kasaninya] // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2020. Issue 5. Pp. 344–349. ISSN 2071-6168.
12. Rubber-cord coupling joint of a traction drive of the 2TE121 locomotive [Rezinokordnaya mufta tyagovogo privoda teplovoza 2TE121] / V. I. Vlasov, E. M. Bogopol'skiy, Yu. I. Sokolenko, O. M. Studentsov // Testing results of the 2TE121 diesel locomotive : proceedings of VNIIT (JSC «Scientific and Production Company for the Introduction of Scientific and Engineering Innovations»). 1985. Issue 62. Pp. 131–135.
13. Increase of reliability of diesel locomotive underframe [Povyshenie nadezhnosti ekipazhnoy chasti teplovozov] : monograph / A. I. Belyaev, B. B. Bunin, S. M. Golubyatnikov [et al.] ; ed. by L. K. Dobrynin. Moscow : Transport, 1984. 248 p.
14. Regarding the endurance lifespan of rubber-cord elements of a traction drive coupling joint of the EP1 passenger electric locomotive [O resurse rezinokordnykh elementov mufty tyagovogo privoda passazhirskogo elektrovoza EP1] / Yu. N. Sokolov, P. M. Surovtsev, V. E. Degtyarev, A. S. Ponomarev // Experimental research and design developments to ensure performance capability, improve reliability and efficiency of the rolling stock and its components : Bulletin of VNIKTI (JSC «Scientific Research and Design-Technological Institute of Rolling Stock»). 2011. Issue 93. Pp. 40–51.
15. Expansion coupling of locomotive traction drive [Kompensatsionnaya mufta tyagovogo privoda lokomotiva] / V. I. Vorobyev, D. Ya. Antipin, O. V. Izmerov [et al.] : patent for utility model 172577 Russian Federation. No. 2017106452 ; filed 27.02.2017 ; publ. 13.07.2017, Bulletin No. 20.
16. Dynamic loads in a traction drive of the 2TE121 locomotive [Dinamicheskie nagruzki v tyagovom privode teplovoza 2TE121] / A. T. Litvinov, E. P. Akishin, F. G. Verber [et al.] // Testing results of the 2TE121 locomotive : proceedings of VNIIT (JSC «Scientific and Production Company for the Introduction of Scientific and Engineering Innovations»). 1985. Issue 62. Pp. 119–130.
17. Locomotive traction drive [Tyagovyy privod lokomotiva] / V. I. Vorobyev, D. Ya. Antipin, A. S. Kosmodamianskiy [et al.] : patent for utility model 189364 Russian Federation. No. 2017137866 ; filed 30.10.2017 ; publ. 21.05.2019, Bulletin No. 15.
18. Locomotive traction drive [Tyagovyy privod lokomotiva] / V. I. Vorobyev, D. Ya. Antipin, O. V. Izmerov [et al.] : patent for utility model 206748 Russian Federation. No. 2021103327 ; filed 10.02.2021 ; publ. 24.09.2021, Bulletin No. 27.

Объем статьи 1,14 авторских листа

УДК 625.151

Борис Эйнихович Глюзберг, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией научного центра «Путевая инфраструктура и вопросы взаимодействия колесо — рельс» АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ И КИНЕМАТИКИ ДВИЖЕНИЯ ПО СОЧЕТАНИЯМ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ РЕЗЕРВОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ГОРЛОВИН СТАНЦИЙ

Boris Eynikhovich Glyuzberg, DSc in Engineering, Professor, Head of Laboratory of Scientific Centre Track Infrastructure and Issues of Wheel — Rail Interaction, JSC «VNIIZhT», Moscow, Russia

### Analysis of movement dynamics and kinematics by combinations of switches for the fulfillment of reserves for increasing the throughput of station necks

#### Аннотация

Рассмотрены способы повышения пропускной способности линий, основанные на ликвидации ограничения скоростей движения в горловинах станций путем усовершенствования стрелочного хозяйства. Показаны возможности реализации этих способов за счет изменения геометрии стрелочных переводов и их комбинаций.

**Ключевые слова:** скорости движения, горловины станций, стрелочные переводы, сочетания конструкций, реальные условия работы, повышение эффективности перевозочного процесса.

#### Abstract

The methods of increasing the throughput capacity of railway lines on the basis of elimination of speed limits at station necks by improving switching service facilities are considered. The potential of implementing these methods by changing the geometry of switch throws and their combinations is illustrated.

**Keywords:** movement speeds, station necks, switch throws, combinations of structures, actual operating conditions, increasing the efficiency of a transportation process.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-49-53

Перед железнодорожным транспортом России поставлена задача существенного наращивания объемов перевозочной работы с минимальными затратами. Особенно это актуально на дорогах восточного региона — Транссибе и БАМе, где необходимо обеспечить существенное повышение объемов перевозочной работы в короткое время.

В горловинах станций железных дорог ОАО «РЖД» работают в основном одиночные обыкновенные стрелочные переводы марок 1/11 и 1/9 с конструкционной скоростью движения по ним на ответвленное направление 50–40 км/ч [1] в зависимости от конкретных сочетаний и размеров междупутья.

В соответствии с используемыми на железных дорогах России методиками проектирования стрелочных переводов факторами, ограничивающими конструкционную скорость движения подвижного состава на ответвление, являются динамико-кинематические характеристики, прочностные параметры и показатели воздействия на пассажиров и грузы.

При проектировании геометрии стрелочного перевода рассматривают условия движения экипажей исходя из внезапно возникающего при набегании колес на остряк ускорения  $j$ , непогашенного ускорения при движении по стрелочной кривой  $\gamma$ , параметров, связанных с потерей кинетической энергии при входе на боковой путь  $W_0$  и при набеганиях на направляющие элементы крестовинного узла  $W_i$  [2].

Величины этих характеристик для типовых стрелочных переводов, используемых на российских железных дорогах, приведены в табл. 1.

Опыт проектирования и эксплуатации стрелочных переводов на российских железных дорогах показывает, что работать необходимо в следующих диапазонах значений этих параметров:

$$j = 0,3\text{--}0,5 \text{ м/с}^2; \gamma = 0,4\text{--}0,6 \text{ м/с}^2;$$

$$W_0 = 0,210\text{--}0,250 \text{ м/с}; W_i = 0,4\text{--}1,0 \text{ м/с}.$$

Таблица 1

Динамико-кинематические характеристики  
типовых стрелочных переводов железных дорог России

Тип рельса	Марка стрелочного перевода	Радиус, м		Скорость, км/ч	Ускорение, м/с <sup>2</sup>		Параметр потери кинетической энергии, м/с
		стрелки	переводной кривой		внезапно возникшее	непогашенное	
Р65	1/9	300,000	200,060	25	0,160	0,241	0,120
				40	0,412	0,617	0,191
				50	0,643	0,964	0,239
Р65	1/11	300,000	300,000	25	0,160	0,160	0,120
				40	0,412	0,412	0,191
				50	0,643	0,643	0,239
				60	0,925	0,925	0,287

Таблица 2

Скорость изменения ускорений при входе в стрелочную кривую  
и в кузове пассажирского вагона при движении по стрелочному переводу

Тип рельса	Марка стрелочного перевода	Скорость, км/ч	Скорость изменения ускорения (наибольшая), м/с <sup>3</sup>		Наибольшее ускорение в кузове вагона, м/с <sup>3</sup>
			Пассажирский вагон ЦМВ	Грузовой вагон	
Р65	1/9	25	0,10	0,26	0,9
		40	0,40	1,03	2,2
		50	0,79	2,01	2,5
Р65	1/11	25	0,07	0,18	0,9
		40	0,27	0,69	1,9
		50	0,53	1,34	2,2
		60	0,91	2,32	2,6

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что по стрелочным переводам марки 1/9 конструкционная скорость близка к 40 км/ч, а по переводам марки 1/11 с небольшим превышением по ускорениям она составляет 50 км/ч. Эти величины скорости зафиксированы в нормативно-технической и конструкторской документации. Однако в практике эксплуатации скорость на ответвление по переводам марки 1/9 ограничивают 25 км/ч, а по переводам марки 1/11 — 40 км/ч.

Для анализа причин рассмотрим еще одну характеристику движения экипажей по стрелочному переводу — скорость изменения ускорения при входе на стрелочную кривую  $\Psi$  [3].

Устройство стрелочных кривых имеет ряд особенностей, отличающих их от устройства кривых на перегоне. У стрелочных кривых отсутствуют участки переходной кривизны и возвышение наружного рельса. Кроме того, в конструкции стрелочных переводов с криволинейными остриями секущего типа (основной тип для российских железных дорог [4, 5]) в местах примыкания острия к рамному рельсу имеется начальный стрелочный угол, т.е. стрелочная кривая примыкает к прямой не только без плавного сопряжения, но и под углом. Эти особенности определяют вписывание экипажей в стрелочные кривые [6–9]. Помимо этого, величина  $\Psi$  зависит от жесткой базы экипажа.

В табл. 2 приведены расчетные величины  $\Psi$  для пассажирского (база 17 м) и грузового вагона с короткой базой (6,65 м).

Как видно из табл. 2, при  $\Psi < 0,8$  м/с<sup>3</sup> скорость движения по стрелочным переводам марки 1/9 для грузовых поездов должна быть менее 40 км/ч, а для переводов марки 1/11 — менее 50 км/ч.

Скорость изменения ускорения ограничивает скорость движения экипажей по ответвлению в основном на стрелочных переводах в случае, когда имеет место их работа в составе комбинаций (сочетаний) [9, 10]. Например, по съездам с междупутьем 4100 мм с учетом требований движения по S-образным кривым необходимо ограничить скорость движения пассажирских поездов по стрелочным переводам марки 1/9 величиной 30 км/ч.

Таким образом, по всему комплексу расчетных динамико-кинематических параметров скорость движения на ответвление для выпускаемых в настоящее время переводов марки 1/9 с учетом их использования в составе различных сочетаний следует устанавливать 25–30, для переводов марки 1/11 — 40 км/ч.

Условия комфортабельности для пассажиров и для сохранности грузов при движении поездов по стрелочным переводам исследуются с помощью прямых экспериментальных методов. В качестве критерия допустимых воздействий используются величины ускорений в кузове экипажа. На стрелочных переводах эту величину для пассажиров ограничивают 2,0 м/с<sup>2</sup>.

В табл. 2 представлены результаты измерений ускорений в кузове пассажирского вагона, полученные при испытаниях, проведенных лабораторией «Стрелочное хозяйство» АО «ВНИИЖТ». Как видно из данных табл. 2, по этому параметру скорость движения на ответвленное направление стрелочных переводов марки 1/9 должна быть ниже 40 км/ч, а переводов марки 1/11 — около 40 км/ч.

Другими критериями, определяющими скорости движения по стрелочным переводам, являются показатели прочности. Показатели прочности рельсовых элементов стрелочных переводов ограничивают скорость движения по ним в основном тяжелых экипажей.



Например, испытания показали, что от воздействия грузовых вагонов с нагрузкой 250 кН/ось максимальные вероятные напряжения превышают нормируемые в кромках подошвы переднего вылета рамного рельса переводов 1/11–1/9 при скорости 50 км/ч на 10–15 %, в остряке — на 5–7 %, в рельсах упорной нити переводной кривой — до 10 %. Следует также отметить, что при предельных допусках состояниях колеи на стрелочном переводе эти превышения еще больше. В настоящее время разрабатываются расчетные способы определения параметров взаимодействия экипажей и стрелочных переводов [11, 12], но пока результаты их применения пригодны в основном для оценочных выводов.

Общий анализ приведенных материалов показывает, что реальные возможности повышения скорости движения по мас- сово применяемым в настоящее время стрелочным перево- дам ограничены.

Возможны следующие направления решения задачи повы- шения скорости движения в горловинах станций: увеличение скоростей движения по сочетаниям стрелочных переводов, общая геометрия которых не ограничивает скоростей движе- ния; разработка стрелочных переводов с измененной геоме- трией, взаимозаменяемых с типовыми; реконструкция с заме- ной стрелочных переводов на более пологие.

С точки зрения минимизации затрат на повышение скоро- сти движения поездов в горловинах станций наиболее целе- сообразными являются первое и второе направления.

С освоением российскими стрелочными заводами производ- ства криволинейных крестовин появилась возможность пере- смотреть общую геометрию стрелочных переводов за счет раз- унификации правых и левых переводов, увеличив радиусы стре- лочных кривых при той же практической длине конструкции. Расчеты показали, что без ущерба для возможности работы стрелочных переводов в составе съездов и других комбинаций

соединений путей стрелочные переводы марок 1/9 и 1/11, взаимо- заменяемые с типовыми, можно выполнить с минимальными ра- диусами стрелочных кривых соответственно 275 и 400 м [13, 14].

Динамико-кинематические характеристики таких перево- дов приведены в табл. 3 (варианты 1 и 2). Как видно из этих данных, стрелочные переводы марки 1/9 с радиусом стрелоч- ной кривой 275 м обеспечивают скорость движения 40 км/ч и для грузовых, и для пассажирских поездов. Стрелочные пе- реводы марки 1/11 с радиусом 400 м позволяют установить по ним скорость движения поездов 50 км/ч.

При этом только самые короткобазные грузовые вагоны бу- дут иметь 10 %-е превышение по такому параметру, как ско- рость изменения ускорений при входе в стрелочную кривую, что в стесненных условиях может быть допущено.

Расчеты показали, что при укладке таких переводов в ком- бинации и съезды с S-образным расположением кривых ди- намико-кинематические характеристики как для грузовых, так и для пассажирских вагонов находятся в пределах действо- щих нормативов [15].

Еще большее повышение скорости движения поездов по гор- ловинам станций требует разработки стрелочных переводов более пологих марок.

В качестве примера в табл. 3 приведены возможные базо- вые расчетные варианты 3–5 переводов марок 1/14 и 1/15. Наилучшие результаты дает вариант 5, который обеспечивает скорость движения 70 км/ч для пассажирских и 60 км/ч для грузовых поездов с базой не менее базы полувагона. Коротко- базные хоппер-дозаторы смогут проходить такие стрелочные переводы также со скоростью 60 км/ч с небольшим, но при- емлемым превышением такого параметра, как скорость изме- нения ускорения при входе в стрелочную кривую.

Подробная проработка вариантов 3–5 позволит еще бо- лее улучшить их динамико-кинематические характеристики.

Таблица 3

Динамико-кинематические характеристики предлагаемых стрелочных переводов

№ варианта	Тип рельса	Марка стрелочного перевода	Минимальный радиус, м	Скорость, км/ч	Непогашенное ускорение, м/с <sup>2</sup>	Скорость изменения ускорения (наибольшая), м/с <sup>3</sup>		Наибольшее ускорение в кузове пассажирского ЦМВ, м/с <sup>2</sup>
						Пассажирский ЦМВ	Грузовой вагон	
1	P65	1/9	275,000	40	0,448	0,29	0,75	1,9
2	P65	1/11	400,000	50	0,482	0,39	0,90	2,0
				60	0,693	0,68	1,73	2,2
3	P65	1/14	600,000	50	0,322	0,26	0,67	1,6
				60	0,463	0,45	1,16	2,1
				70	0,630	0,72	1,84	2,1
4	P65	1/15	620,000	60	0,450	0,44	1,12	2,0
				70	0,610	0,70	1,78	2,1
5	P65	1/15	690,000	60	0,40	0,39	0,95	1,8
				70	0,55	0,63	1,60	2,0

Примечание. Значения непогашенного ускорения рассчитаны с использованием зависимостей, полученных при динамико-прочностных испытаниях стрелочных переводов.

Итак, анализ инфраструктуры стрелочного хозяйства станций выявил основные направления возможного повышения пропускной способности в их горловинах без реконструкции — за счет использования резервов требований к динамико-кинематическим характеристикам движения по сочетаниям существующих стрелочных переводов.

По ряду сочетаний стрелочных переводов скорости могут быть увеличены на 15–20 км/ч, а по отдельным видам сочетаний — до конструктивных для скоростей движения по одиночным стрелочным переводам данного типа и марки.

Проверка возможностей практической реализации этих предложений про-

ведена на станции Александров-1 Московской железной дороги. Скорости на основных маршрутах входа грузовых поездов со стороны Москвы по результатам испытаний были повышены с 25 до 40 км/ч. При этом эксплуатационная работа стрелочных переводов стабильна, а дополнительные затраты на их содержание незначительны.

## Литература

1. Королев В. В. Предложение по применению криволинейных стрелочных переводов на Забайкальской железной дороге // Железнодорожный транспорт на современном этапе развития. Задачи и пути их решения : сборник статей молодых ученых и аспирантов. Москва : Интекст, 2005. С. 32–36.
2. Королев В. В. Разработка нового контррельса, не связанного с ходовым рельсом // Безопасность движения поездов : материалы 11-й научно-практической конференции, Москва, 21–22 октября 2010 г. Москва : МИИТ, 2010. С. XIV–36.
3. Королев В. В. Технология санации для ремонта деревянных брусев и шпал // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2011. Т. 4. № 4 (4). С. 67–68.
4. Титаренко М. И., Королев В. В. Анализ работы стрелочных башмаков, изготовленных по различным технологиям // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2012. Т. 5. № 5 (5). С. 109–110.
5. Глюзберг Б. Э., Титаренко М. И., Королев В. В. Рельсовые элементы стрелочных переводов // Железнодорожный транспорт. 2013. № 11. С. 44–46. ISSN 0044-4448.
6. Королев В. В. Новые виды отказов подкладок с подушками и подкладок с упорами // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2014. Т. 7. № 7 (7). С. 51–63.
7. Королев В. В., Мальцев В. А. Организация работ по контролю рельсовых элементов стрелочных переводов на железных дорогах России // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2014. Т. 7. № 7 (7). С. 43–50.
8. Королев В. В. Новый контррельс для стрелочных переводов // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. 2014. № 10. С. 46–48.
9. Королев В. В., Жукова А. А. Сравнительный анализ технологических процессов укладки стрелочных переводов различными машинными комплексами // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2015. Т. 8. № 8 (8). С. 161–165.
10. Применение методов анализа сочетаний размеров колесных пар и элементов стрелочных переводов для определения размеров желобов контррельсовых узлов / Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, В. В. Королев, В. С. Кусков // Транспорт Урала. 2021. № 2 (69). С. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-3-9. ISSN 1815-9400.
11. Korolev V. Selecting a turnout curve form in railroad switches for high speeds of movement // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258 AISC. Pp. 156–172. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5\_15.

## References

1. Korolev V. V. Proposal on application of double curve switches on the Zabaikal Railway [Predlozhenie po primeneniyu krivolineynykh strelochnykh perevodov na Zabaykal'skoy zheleznoy doroge] // Railway transport on modern stage of development. Tasks and ways of their solution : collection of papers of young scientists and post-graduates. Moscow : Intext, 2005. Pp. 32–36.
2. Korolev V. V. Development of a new check-rail not connected to a running rail [Razrabotka novogo kontrol'sya, ne svyazannogo s khodovym rel'som] // Safety of railway operation : proceedings of the 11th research and practice conference, Moscow, October 21–22, 2010. Moscow : Publishing House of MIIT, 2010. Pp. XIV–36.
3. Korolev V. V. Technology of sanation for repair of wooden sleepers [Tekhnologiya sanatsii dlya remonta derevyannykh brus'ev i shpal] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2011. Vol. 4. No. 4 (4). Pp. 67–68.
4. Titarenko M. I., Korolev V. V. Analysis of operation of heel chairs made according to different technologies [Analiz raboty strelochnykh bashmakov, izgotovlennyykh po razlichnym tekhnologiyam] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2012. Vol. 5. No. 5 (5). Pp. 109–110.
5. Glyuzberg B. E., Titarenko M. I., Korolev V. V. Rail elements of switches [Rel'sovye elementy strelochnykh perevodov] // Railway Transport. 2013. No. 11. Pp. 44–46. ISSN 0044-4448.
6. Korolev V. V. New types of failures of plates with pads and plates with stop blocks [Novye vidy otkazov podkladok s podushkami i podkladok s uporami] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2014. Vol. 7. No. 7 (7). Pp. 51–63.
7. Korolev V. V., Maltsev V. A. Organization of control of rail elements in switches on Russian railways [Organizatsiya rabot po kontrolyu rel'sovykh elementov strelochnykh perevodov na zheleznykh dorogakh Rossii] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2014. Vol. 7. No. 7 (7). Pp. 43–50.
8. Korolev V. V. New check rail for switches [Novyy kontrol's dlya strelochnykh perevodov] // Modern problems of railway transport work improvement. 2014. No. 10. Pp. 46–48.
9. Korolev V. V., Zhukova A. A. Comparative analysis of technological processes of switch laying by various machine groups [Srvnitel'nyy analiz tekhnologicheskikh protsessov ukladki strelochnykh perevodov razlichnymi mashinnymi kompleksami] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2015. Vol. 8. No. 8 (8). Pp. 161–165.
10. Application of methods for analysing combinations of wheelset sizes and switch elements to determine the size of gutters of check-rail assemblies [Primenenie metodov analiza sochetaniy razmerov kolesnykh par i elementov strelochnykh perevodov dlya opredeleniya razmerov zhelobov kontrol'sovykh uzlov] / B. E. Glyuzberg, A. A. Loktev, V. V. Korolev, V. S. Kuskov // Transport of the Urals. 2021. No. 2 (69). Pp. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-3-9. ISSN 1815-9400.
11. Korolev V. Selecting a turnout curve form in railroad switches for high speeds of movement // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258 AISC. Pp. 156–172. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5\_15.

12. Korolev V. Change of geometric forms of working surfaces of turnout crosspieces in wear process // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258 AISC. Pp. 207–218. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5\_19.
13. Korolev V. Guard Rail Operation of Lateral Path of Railroad Switch // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115 AISC. Pp. 621–638. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2\_60.
14. Korolev V. Switching Shunters on a Slab Base // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1116 AISC. Pp. 175–187. DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3\_17.
15. Korolev V. The study of rolling stock wheels impact on rail switch frogs // E3S Web of Conferences: Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019, Moscow, November, 20–22, 2019. Moscow : EDP Sciences, 2020. P. 03033. DOI: 10.1051/e3sconf/202016403033.

12. Korolev V. Change of geometric forms of working surfaces of turnout crosspieces in wear process // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258 AISC. Pp. 207–218. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5\_19.
13. Korolev V. Guard Rail Operation of Lateral Path of Railroad Switch // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115 AISC. Pp. 621–638. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2\_60.
14. Korolev V. Switching Shunters on a Slab Base // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1116 AISC. Pp. 175–187. DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3\_17.
15. Korolev V. The study of rolling stock wheels impact on rail switch frogs // E3S Web of Conferences: Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019, Moscow, November 20–22, 2019. Moscow : EDP Sciences, 2020. P. 03033. DOI: 10.1051/e3sconf/202016403033.

*Объем статьи 0,5 авторских листа*

УДК 656.135

**Николай Степанович Захаров, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сервис автомобилей и технологических машин» Тюменского индустриального университета (ТИУ), Тюмень, Россия,**

**Светлана Александровна Теньковская, аспирант кафедры «Сервис автомобилей и технологических машин» Тюменского индустриального университета (ТИУ), Тюмень, Россия,**

**Александр Эрнстович Александров, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия**

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПУТЕМ ОГРАНИЧЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ АВТОМОБИЛЕЙ

**Nikolay Stepanovich Zakharov, DSc in Engineering, Professor, Head of Car Service and Technological Machinery Department, Tyumen Industrial University (TIU), Tyumen, Russia,**

**Svetlana Alexandrovna Ten'kovskaya, postgraduate student, Service and Technological Machinery Department, Tyumen Industrial University (TIU), Tyumen, Russia,**

**Alexander Ernstovich Alexandrov, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia**

### Improving the operation reliability of transport and technological systems by limiting vehicle service lifetime

#### Аннотация

К числу актуальных проблем нефтегазодобывающих предприятий Западной Сибири относится низкий уровень состояния транспортных средств, значительная часть которых эксплуатируется с превышением допустимых норм срока службы. Один из основных путей повышения экономичности, надежности и безопасности автомобилей — это ограничение предельного срока их эксплуатации. Целью исследования, представленного в статье, является разработка методики определения рационального срока службы автомобилей, обеспечивающего повышение надежности функционирования транспортно-технологических систем нефтегазодобывающих предприятий в условиях Западной Сибири. Научная новизна заключается в установлении закономерностей и создании математических моделей влияния возраста и наработки на коэффициент технической готовности автомобилей. Методическая основа статьи — систематизация исследовательских работ, нормативных документов, научно-технической литературы, а также элементы системного подхода, методы экспертных оценок, математической статистики и экономического анализа. Выявлено, что все рассмотренные методы определения рациональных сроков службы имеют ограниченную область использования. Предложено устанавливать предельные сроки эксплуатации с помощью метода, который, в отличие от большинства известных, учитывает влияние на коэффициент технической готовности не только наработки с начала эксплуатации, но и интенсивности использования автомобилей. Показано, что в общем случае между возрастом автомобилей и наработкой с начала эксплуатации отсутствует статистически значимая линейная корреляция. Разработаны однофакторные и двухфакторная модели закономерностей влияния указанных показателей на коэффициент технической готовности. Проверена адекватность предложенных моделей, установлены численные значения их параметров. Полученные зависимости позволили разработать методику определения предельного возраста автомобилей с учетом интенсивности их использования. Эффект образуется за счет более точного определения срока службы автомобилей, что влияет на повышение коэффициента технической готовности. Дальнейшие исследования в данной области будут направлены на разработку методики корректирования предельного срока службы автомобилей с учетом условий их эксплуатации.

**Ключевые слова:** надежность функционирования транспортно-технологических систем, автомобильный транспорт, коэффициент технической готовности, наработка автомобилей, срок службы автомобилей.

#### Abstract

Among the urgent problems of oil and gas producing enterprises in Western Siberia is the low level of condition of vehicles, a significant part of which is operated in excess of permissible service lifetime standards. One of the main method to increase the efficiency, reliability and safety of vehicles is to limit the maximum lifetime of their operation. The purpose of the research presented in this article is to develop a methodology for determining the rational service life of vehicles, ensuring an increase in the reliability of functioning of transport and technological systems of oil and gas producing enterprises in Western Siberia. The scientific novelty consists in establishing patterns and creating mathematical models of the impact of age and operating time on the coefficient of technical readiness of automobiles. The methodological basis of the article is the systematization of research papers, regulatory documents, scientific and technical publications, as well as elements of a systematic approach, methods of expert assessments, mathematical statistics and economic analysis. It is revealed that all the considered methods for determining rational service lifetime have a limited scope of use. It is proposed to set the operating time limits using a method that, unlike most of the known ones, takes into account the impact on the technical readiness coefficient not only of operating time from the beginning of operation, but also of the intensity of vehicle use. It is illustrated that, in general, there is no statistically significant linear correlation between the age of vehicles and their operating time since the beginning of operation. One-factor and two-factor model patterns of the impact of these indicators on the coefficient of technical readiness have been developed. The validity of the proposed models has been verified, numerical values of their parameters have been established. The obtained correlations made it possible to develop a methodology for determining the maximum age limit of vehicles, taking into consideration the intensity of their use. The effect is formed due to a more accurate determination of the service lifetime of automobiles, which affects the increase in the coefficient of technical readiness. Further research in this area will be aimed at developing a methodology for adjusting the vehicle service lifetime with consideration to their operating conditions.

**Keywords:** operation reliability of transport and technological systems, road transport, coefficient of technical readiness, operating time of vehicles, vehicle service lifetime.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-54-59

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях Западной Сибири автомобильный транспорт в нефтегазодобывающей отрасли играет первостепенную роль, так как дает возможность доставлять грузы без перегрузки и выполнять работу на больших расстояниях от места постоянного базирования. Сегодня большинство предприятий нефтегазодобывающей отрасли Западной Сибири не содержат на своем балансе технику, а получают ее по договору аренды от автотранспортных компаний. Основной проблемой таких договоров является отсутствие нормативного документа, в котором указан предельный возраст предоставляемых автомобилей. Соответственно нередко автотранспортные предприятия передают автомобили, которые выходят из строя, что нарушает бесперебойный процесс поставки груза и приводит к большим потерям.

Один из путей решения этой проблемы — создание нормативного документа, ограничивающего срок использования автомобилей. Известны различные способы расчета рационального срока эксплуатации подвижного состава [1–5]. Для реализации большинства из них необходимо знать, как с увеличением времени и наработки с начала эксплуатации меняются показатели надежности автомобилей. Поэтому одна из задач представленного исследования — установление закономерностей влияния наработки и возраста на коэффициент технической готовности автомобилей.

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Изучению рационального срока эксплуатации автомобилей с использованием аналитических, графических, статистических, технико-экономических и других методов уделяется немало внимания как в нашей стране, так и за рубежом [6–18 и др.]. В основе большинства методов лежит определение критерия оптимальности, в качестве которого могут выступать минимум затрат, максимум прибыли и другие показатели [2, 19–23]. Например, Э. Р. Латыпова [24] и Н. Сухов [25] в качестве критерия оптимальности предлагают использовать отдельные составляющие себестоимости выполненных работ, а Н. В. Чикурина [26] — приведенные затраты.

Обзор литературных источников позволил установить, что в большинстве методик критерием оптимальности выбран минимум затрат. Авторы предлагают использовать для определения срока службы автомобилей технико-экономический метод, который не всегда возможно применить, так как при определенной интенсивности эксплуатации зависимость суммарных затрат на эксплуатацию от наработки или возраста не будет иметь ярко выраженный минимум либо минимума вообще может не быть, что подробно описано в следующем разделе.

## МЕТОДЫ

В ходе теоретического исследования была выдвинута гипотеза, что при использовании технико-экономического метода в ряде случаев у кривой суммарных затрат на приобретение и эксплуатацию автомобилей не наблюдается ярко выраженного минимума. В зависимости от интенсивности эксплуатации автомобилей и их начальной стоимости возможны три основных случая наличия минимума на кривой  $C_{\Sigma} = f(T)$  (рис. 1): четко выраженный минимум, нечетко выраженный минимум, отсутствие минимума.

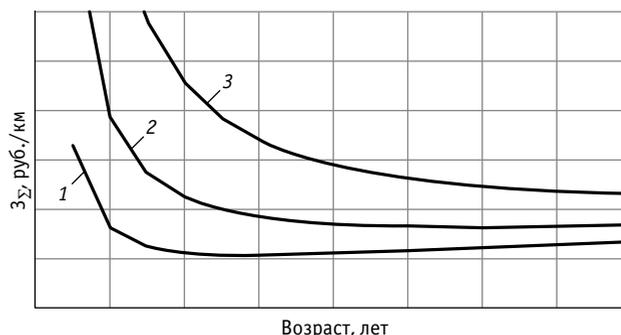


Рис. 1. Гипотезы о виде целевой функции  $C_{\Sigma} = f(T)$ :  
1 — наличие минимума; 2 — нечетко выраженный минимум;  
3 — монотонная зависимость

Таким образом, из рис. 1 видно, что в некоторых случаях минимума нет вообще и кривая имеет монотонный характер. Это обусловлено высокими затратами на приобретение автомобилей, которые, распределяясь на срок службы, компенсируют увеличение затрат на текущий ремонт в зависимости от возраста автомобиля. Следовательно, технико-экономический метод не всегда целесообразно применять при определении рационального срока эксплуатации автомобилей. Чтобы оценить предельный срок эксплуатации, предлагается использовать метод, учитывающий условия надежности транспортно-технологического обслуживания и основанный на установлении предельного значения коэффициента технической готовности.

Для этого необходимо определить зависимость удельных простоев автомобилей в текущем ремонте  $D_{ТР}$  от наработки  $L$  и возраста  $T$ . Предполагается, что такую зависимость можно описать моделью вида

$$D_{ТР} = A_0 + A_1 L^{A_2} + A_3 T^{A_4}, \quad (1)$$

где  $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4$  — константы модели.

С использованием этой модели можно рассчитать потенциальный коэффициент технической готовности  $\alpha_T$  автомобилей для разных наработок с начала эксплуатации и для разных возрастов:

$$\alpha_T = 1 - \frac{D_{ТР} L_T + D_{ТО} \frac{L_T}{L_{ТО}}}{D_{РГ}}, \quad (2)$$

где  $L_T$  — годовой пробег автомобилей, тыс. км;

$D_{ТО}$  — время простоя в техническом обслуживании (ТО), сут на одно обслуживание;

$L_{ТО}$  — периодичность ТО, тыс. км;

$D_{РГ}$  — количество рабочих дней в году.

Расчет предельного возраста автомобилей при разных наработках с начала эксплуатации по критерию надежности обслуживания выполняется по формуле

$$T = \sqrt[4]{\frac{A_4 \left( \frac{D_{РГ}(1 - \alpha_T^{(np)})}{L_T} - \frac{1}{L_{ТО}} - A_0 - A_1 L^2 \right)}{A_3}}, \quad (3)$$

где  $\alpha_T^{(пр)}$  — предельное значение коэффициента технической готовности.

Для реализации предлагаемого метода проведен эксперимент, результаты которого изложены в следующем разделе.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первый этап эксперимента заключался в сборе данных о возрасте, наработках с начала эксплуатации, об отказах и интенсивности эксплуатации автомобилей. Источником информации служили имеющие около 15 млн записей базы данных транспортных предприятий, обслуживающих нефтегазовые компании.

На основе этих данных установлены эмпирические дифференциальное (рис. 2) и интегральное (рис. 3) распределения фактического возраста автомобилей рассматриваемых предприятий. Из рис. 2 видно, что около 20 % автомобилей имеют возраст более 10 лет.

На втором этапе экспериментальных исследований было проверено предположение об отсутствии корреляции между возрастом и наработкой с начала эксплуатации автомобилей. Результаты представлены на рис. 4. Проверка значения коэффициента корреляции по критерию Стьюдента показала отсутствие статистически значимой линейной корреляционной связи, что подтверждает выдвинутое предположение и свидетельствует о необходимости учета интенсивности эксплуатации при определении рационального срока службы автомобилей.

На следующем этапе были собраны данные о простоях автомобилей разного возраста и наработки в текущем ремонте и об интенсивности эксплуатации автомобилей. Кроме того, были рассчитаны удельные простои в ТР (сут/1000 км) в разных интервалах наработки  $L$  и возраста  $T$ :

$$D_{ТР} = 0,060L^{0,51} + 0,206T^{0,55} - 0,209. \quad (4)$$

Результаты, полученные для зависимости удельных простоев автомобилей в ТР от наработки и возраста, представлены на рис. 5.

С использованием формулы (2) значения  $D_{ТР}$  были пересчитаны в коэффициент технической готовности, что позволило построить график, показанный на рис. 6.

Далее с использованием формулы (3) был рассчитан предельный возраст автомобилей по критерию надежности обслуживания при разных значениях наработки с начала эксплуатации  $L$  и интенсивности эксплуатации  $I$  (табл. 1).

При аппроксимации результатов расчета степенной моделью получен график, представленный на рис. 7.

Методику определения рационального срока службы автомобилей по критерию надежности обслуживания можно представить так, как показано на рис. 8.

На основе полученных результатов были разработаны таблицы с предельными сроками службы автомобилей (табл. 2).

Внедрение результатов исследований предполагает снижение средневзвешенного возраста автомобилей с 9,85 до 6,1 лет, что позволит повысить коэффициент технической готовности на 8,7 %.

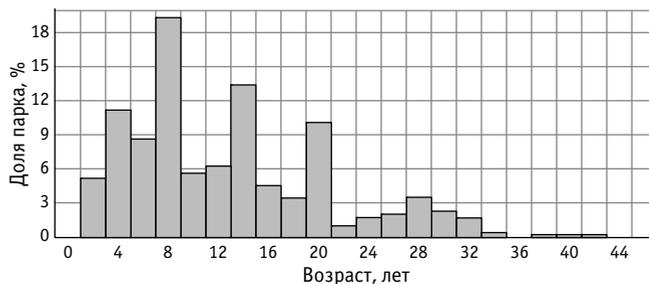


Рис. 2. Распределение фактического возраста автомобилей

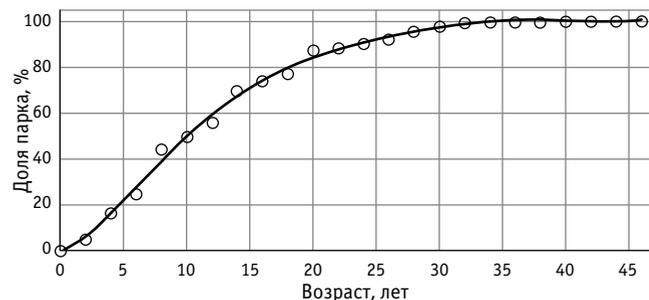


Рис. 3. Интегральное распределение возраста автомобилей

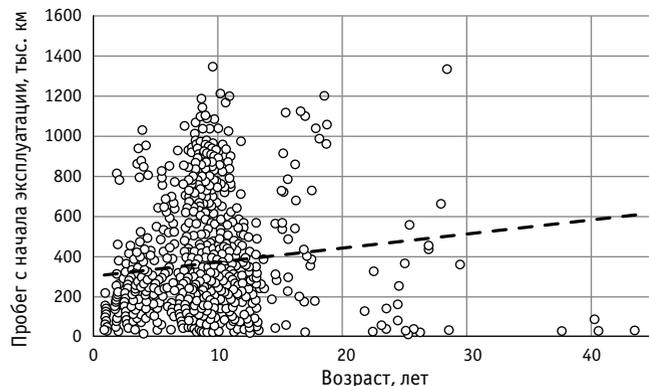


Рис. 4. Связь между возрастом и наработкой автомобилей

Таким образом, в процессе исследований были установлены закономерности влияния наработки и возраста на коэффициент технической готовности автомобилей, разработана методика определения срока службы автомобилей, обеспечивающая заданный уровень надежности транспортно-технологического обслуживания.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволили сделать ряд выводов.

Наиболее распространен технико-экономический метод определения рационального срока службы автомобилей, основанный на минимизации суммарных затрат на их приобретение и эксплуатацию. Исследование показало, что в большинстве случаев на кривой суммарных затрат не наблюдается ярко выраженного минимума, что делает невозможным применение данного метода.

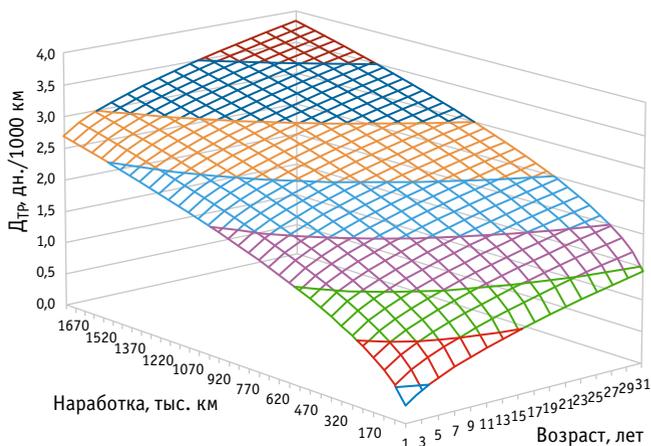


Рис. 5. Графический вид модели влияния возраста и наработки с начала эксплуатации на удельные простои автомобилей в ТР

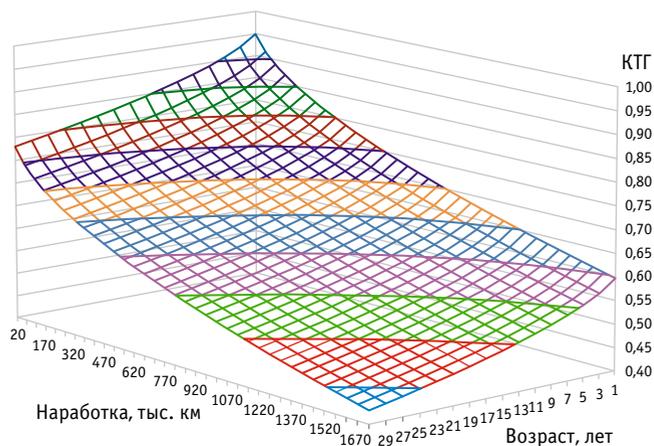


Рис. 6. Графический вид модели влияния возраста и наработки с начала эксплуатации на коэффициент технической готовности (КТГ)

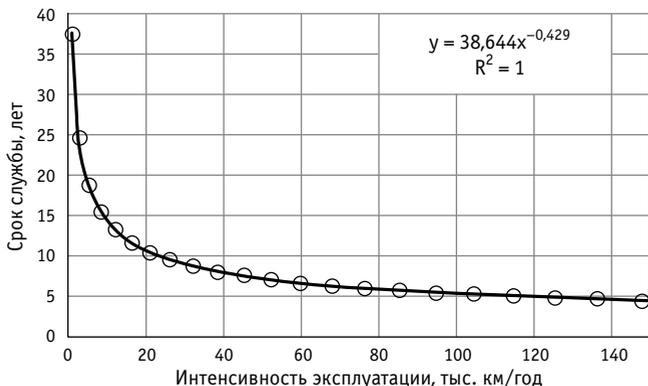


Рис. 7. Влияние интенсивности эксплуатации на предельный срок службы автомобилей по критерию надежности обслуживания

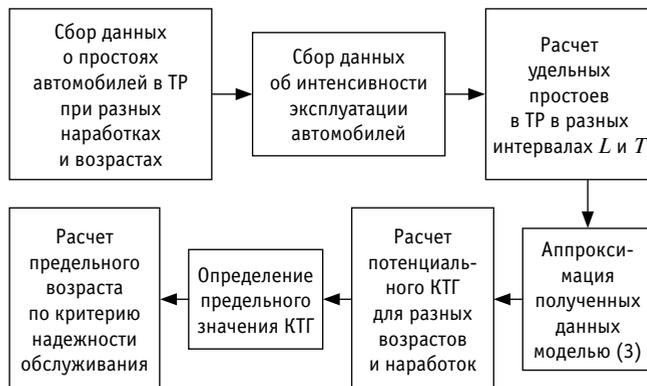


Рис. 8. Методика расчета рационального срока службы автомобилей по критерию надежности обслуживания

Таблица 1

Расчет предельного возраста автомобилей по критерию надежности обслуживания

$L$ , тыс. км	$l$ , тыс. км/год	$T$ , лет
20	0,59	34,11
70	2,89	24,18
120	6,52	18,40
170	11,93	14,25
220	19,90	11,05
270	31,73	8,51
320	49,60	6,45
370	77,46	4,78
420	122,90	3,42
470	202,13	2,33

Таблица 2

Фрагмент таблицы с предельными сроками службы автомобилей

Марка и модель автомобиля	Предельный возраст, лет, при интенсивности эксплуатации (тыс. км/год)								
	до 5	свыше 5–10	свыше 10–20	свыше 20–30	свыше 30–40	свыше 40–60	свыше 60–80	свыше 80–100	свыше 100
«Урал-4320»	25	20	17	15	13	11	10	9	8
«КАМАЗ-43118»	23	20	17	15	14	13	12	11	10
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Установлены эмпирические распределения фактического возраста и наработок с начала эксплуатации автомобилей. Около 20 % автомобилей имеют возраст более 10 лет и наработку свыше 400 тыс. км.

Определено, что между возрастом автомобилей и наработкой с начала эксплуатации статистически значимая линейная корреляция отсутствует.

На основе фактических данных построено двумерное распределение коэффициента технической готовности автомобилей по наработке и возрасту.

Влияние возраста автомобилей и наработки с начала эксплуатации на коэффициент технической готовности адекватно описывается степенными моделями. На основе эксперимента проверена адекватность предложенных моделей и установлены численные значения их параметров.

С использованием полученных зависимостей разработана методика определения предельного возраста автомобилей по условиям надежности транспортно-технологического обслуживания, учитывающая интенсивность их использования.

## Литература

1. Авдонкин Ф. Н. Изменение технического состояния автомобиля в процессе эксплуатации. Саратов : Изд-во СГУ, 1973. 190 с.
2. Бедняк М. Н. Определение нормы гарантийного пробега автомобилей. Киев : Изд-во КГУ, 1972. 105 с.
3. Тайсаев К. К. Методика определения коэффициента сохранения эффективности автобусов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2021. 151 с.
4. Тайсаев К. К. Актуальность определения коэффициента сохранения эффективности автомобиля в современных условиях эксплуатации // Грузовик. 2020. № 1. С. 33–35. ISSN 1684-1298.
5. Тайсаев К. К., Терентьев А. В. Аналитическая модель определения коэффициента сохранения эффективности автобусов // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 197–202. ISSN 1999-5571.
6. Захаров Н. С., Шорохов Ю. А., Галимов С. Ш. Стратегия обновления подвижного состава пассажирских автотранспортных предприятий // Нефть и газ Западной Сибири : материалы международной научно-технической конференции. Тюмень : ТюмГНГУ, 2003. С. 134–135.
7. Захаров Н. С., Немков М. В., Немков В. М. Методика выбора марочного состава седельных тягачей с использованием интегрального коэффициента // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2021. № 6. С. 88–95. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-6-88. ISSN 2077-7175.
8. Исследование надежности агрегатов шасси автомобилей Mercedes-Benz Actros / В. И. Некрасов, Р. А. Зиганшин, Н. С. Захаров, К. Ю. Горохов // Наука и бизнес: пути развития. 2021. № 4 (118). С. 14–17. ISSN 2221-5182.
9. К вопросу управления возрастной структурой парка автотранспортных предприятий города Душанбе / А. Н. Ременцов, В. А. Егоров, Д. Ш. Тошев, Х. Б. Хусейнов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2018. № 4 (44). С. 118–122. ISSN 2520-2227.
10. Лукинский В. С., Зайцев Е. И. О зависимостях между параметрами, определяющими ресурс деталей автомобиля // Автомобильный транспорт. 1981. № 11. С. 17–19.
11. Монгуш С. Ч., Ховалыг Н.-Д. К. Сравнительный анализ методов определения оптимальных сроков службы автомобиля // Вестник Тувинского государственного университета. Вып. 3. Технические и физико-математические науки. 2014. № 3 (22). С. 84–91. ISSN 2077-6896.
12. Ременцов А. Н., Тошев Д. Ш., Хусейнов Х. Б. Определение рационального срока службы автобусов в автотранспортных пред-

## References

1. Avdon'kin F. N. Alteration of technical condition of a vehicle during operation [Izmenenie tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobilya v protsesse ekspluatatsii]. Saratov : Publishing House of Saratov State University, 1973. 190 p.
2. Bednyak M. N. Determining warranty mileage standard for vehicles [Opredelenie normy garantynogo probega avtomobilya]. Kiev : Publishing House of Kiev State University, 1972. 105 p.
3. Taysaev K. K. Methodology for determining the efficiency conservation coefficient for buses [Metodika opredeleniya koeffitsienta sokhraneniya effektivnosti avtobusov] : PhD in Engineering Thesis. St. Petersburg, 2021. 151 p.
4. Taysaev K. K. Innovative methods of machine units engineering for high-speed machining of automobile industry details [Aktual'nost' opredeleniya koeffitsienta sokhraneniya effektivnosti avtomobilya v sovremennykh usloviyakh ekspluatatsii] // Gruzovik. 2020. No. 1. Pp. 33–35. ISSN 1684-1298.
5. Taysaev K. K., Terent'ev A. V. Analytical model for assessing the bus efficiency preservation factor [Analiticheskaya model' opredeleniya koeffitsienta sokhraneniya effektivnosti avtobusov] // Bulletin of Civil Engineers. 2020. No. 4 (81). Pp. 197–202. ISSN 1999-5571.
6. Zakharov N. S., Shorokhov Yu. A., Galimov S. Sh. Strategy for updating the vehicle stocks of passenger motor transport enterprises [Strategiya obnoveniya podvizhnogo sostava passazhirskikh avtotransportnykh predpriyatiy] // Oil and gas of Western Siberia : proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Tyumen : Tyumen State Oil and Gas University, 2003. Pp. 134–135.
7. Zakharov N. S., Nemkov M. V., Nemkov V. M. Procedure for selection of gauge composition of truck tractors using integral coefficient [Metodika vybora marochnogo sostava sedel'nykh tyagachey s ispol'zovaniem integral'nogo koeffitsienta] // Intellect. Innovations. Investments. 2021. No. 6. Pp. 88–95. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-6-88. ISSN 2077-7175.
8. The Research on the Reliability of Car Chassis Units Mercedes-Benz Actros [[Issledovanie nadezhnosti agregatov shassi avtomobilye Mercedes-Benz Actros] / V. I. Nekrasov, R. A. Ziganshin, N. S. Zakharov, K. Yu. Gorokhov // Science and Business: Ways of Development. 2021. No. 4 (118). Pp. 14–17. ISSN 2221-5182.
9. To the question of management of the age structure of park of motor transport enterprises of Dushanbe city [K voprosu upravleniya vozrastnoy strukturoy parka avtotransportnykh predpriyatiy goroda Dushanbe] / A. N. Remesov, V. A. Egorov, J. Sh. Toshev, H. B. Huseynov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering studies. 2018. No. 4 (44). Pp. 118–122. ISSN 2520-2227.
10. Lukinskiy B. C., Zaytsev E. I. On the correlations between the parameters which determine the service lifetime of car spare parts [O zavisimostyakh mezhdru parametrami, opredelyayushimi resurs detal'ey avtomobilya] // Road Transport. 1981. No. 11. Pp. 17–19.
11. Mongush S. Ch., Khovalyng N.-D. K. A comparative analysis of methods for determining the optimal working life of machines [Srvnitel'niy analiz metodov opredeleniya optimal'nykh srokov sluzhby avtomobilya] // Bul-

- приятных города Душанбе // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта : сборник научных трудов по материалам 76-й научно-методической и научно-исследовательской конференции. Москва : МАДИ, 2018. С. 178–185.
13. Тайсаев К. К., Терентьев А. В. Алгоритм и программное обеспечение определения коэффициента сохранения эффективности автобусов // Мир транспорта и технологических машин. 2020. № 3 (70). С. 3–8. DOI: 10.33979/2073-7432-2020-70-3-3-8. ISSN 2073-7432.
14. Терентьев А. В., Ефименко Д. Б. К вопросу многокритериальной оценки срока эксплуатации автомобиля // Мир транспорта и технологических машин. 2018. № 1 (60). С. 21–27. ISSN 2073-7432.
15. Тошев Д. Ш. Разработка методики определения оптимального срока эксплуатации автобусов в транспортных предприятиях города Душанбе : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2019. 180 с.
16. Litman T. Transportation Cost Analysis. Victoria Transport Policy Institute, 1999. 48 p.
17. Toffel M. W. The Growing Strategic Importance of End-of-life Product Management // California Management Review. 2003. Vol. 46. Issue 3. Pp. 102–129.
18. Vuchic V. R. Urban Transit: Operations, Planning and Economics. New Jersey : John Wiley & Sons, 2004. 644 p.
19. Арифиллин И. В., Терентьев А. В., Егунова Т. Н. Применение технико-экономического критерия для определения показателя пробега эффективной эксплуатации автомобиля // Транспорт: наука, техника, управление. 2020. № 3. С. 70–74. DOI: 10.36535/0236-1914-2020-03-14. ISSN 0236-1914.
20. Вегер Л. Л. Обновление машинных парков: проблема эффективности. Москва : Наука, 1991. 115 с.
21. Жидкова М. А. Методические основы определения экономически целесообразного срока службы легкового автомобиля такси : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Москва, 1998. 17 с.
22. Южанин И. Н. Обзор методов определения пробега до списания подвижного состава автомобильного транспорта // Интернет-журнал Науковедение. 2014. № 2 (21). eISSN 2223-5167. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/82TVN214.pdf> (дата обращения : 21.07.2022).
23. Эффективность работы автомобилей в зависимости от срока службы / В. Мамыкин [и др.] // Автомобильный транспорт. 1983. № 12. С. 8–9.
24. Латыпова Э. Р. Регулирование транспортных тарифов в условиях перехода к рынку : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Москва, 1995. 27 с.
25. Сухов Н. Срок службы автомобиля // Автомобильный транспорт. 1983. № 9. С. 9–11.
26. Чикурина Н. В. Эффективность лизинговых операций : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Казань, 1995. 21 с.
- letin of Tuva State University. Technical and Physical and Mathematical Sciences. 2014. No. 3 (22). Pp. 84–91. ISSN 2077-6896.
12. Rementsov A. N, Toshev D. Sh., Khuseynov Kh. B. Determining the expedient service lifetime of buses in the motor transport enterprises of the city of Dushanbe [Opredelenie ratsional'nogo sroka sluzhby avtobusov v avtotransportnykh predpriyatiyakh goroda Dushanbe] // Challenges of technical operation and service of vehicle stocks of road transport : a collection of scientific papers based on the materials of the 76th Scientific-Methodological and Research Conference. Moscow : MADI, 2018. Pp. 178–185.
13. Taysaev K. K., Terentyev A. V. Bus efficiency retention factor algorithm and software [Algoritm i programmnoe obespechenie opredeleniya koefitsienta sokhraneniya effektivnosti avtobusov] // World transport and technological machinery. 2020. No. 3 (70). Pp. 3–8. DOI: 10.33979/2073-7432-2020-70-3-3-8. ISSN 2073-7432.
14. Terentyev A. V., Efimenko D. B. To the question of multicriteria assessment of life of the car [K voprosu mnogokriterial'noy otsenki sroka ekspluatatsii avtomobilya] // World transport and technological machinery. 2018. No. 1 (60). Pp. 21–27. ISSN 2073-7432.
15. Toshev D. Sh. Development of a methodology for determining optimal service lifetime of buses in the transport enterprises of the city of Dushanbe [Razrabotka metodiki opredeleniya optimal'nogo sroka ekspluatatsii avtobusov v transportnykh predpriyatiyakh goroda Dushanbe] : PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2019. 180 p.
16. Litman T. Transportation Cost Analysis. Victoria Transport Policy Institute, 1999. 48 p.
17. Toffel M. W. The Growing Strategic Importance of End-of-life Product Management // California Management Review. 2003. Vol. 46. Issue 3. Pp. 102–129.
18. Vuchic V. R. Urban Transit: Operations, Planning and Economics. New Jersey : John Wiley & Sons, 2004. 644 p.
19. Arifullin I. V., Terent'ev A. V., Egunova T. N. Application of technical and economic criteria to determine the mileage of the effective operation of the car [Primenenie tekhniko-ekonomicheskogo kriteriya dlya opredeleniya pokazatelya probega effektivnoy ekspluatatsii avtomobilya] // Transport: science, equipment, management. 2020. No. 3. Pp. 70–74. DOI: 10.36535/0236-1914-2020-03-14. ISSN 0236-1914.
20. Veger L. L. Updating car fleets: the efficacy problem [Obnovlenie mashinnykh parkov: problema effektivnosti]. Moscow : Science, 1991. 115 p.
21. Zhidkova M. A. Methodological bases for determining the economically expedient service lifespan of a taxi vehicle [Metodicheskie osnovy opredeleniya ekonomicheskoi tselesoobraznogo sroka sluzhby legkovogo avtomobilya taksi] : Synopsis of PhD in Economics Thesis. Moscow, 1998. 17 p.
22. Yuzhanin I. N. Review of methods for determining the mileage to retirement rolling stock of road transport [Obzor metodov opredeleniya probega do spisaniya podvizhnogo sostava avtomobil'nogo transporta] // Naukovedenie. 2014. No. 2 (21). eISSN 2223-5167. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/82TVN214.pdf> (access date : 21.07.2022).
23. The operation efficiency of vehicles, depending on the service lifetime [Effektivnost' raboty avtomobiley v zavisimosti ot sroka sluzhby] / V. Mamynkin [et al.] // Road Transport. 1983. No. 12. Pp. 8–9.
24. Latypova E. R. Regulation of transport tariffs in the conditions of transition to a market economy [Regulirovanie transportnykh tarifov v usloviyakh perekhoda k rynku] : Synopsis of PhD in Economics Thesis. Moscow, 1995. 27 p.
25. Sukhov N. Vehicle service lifetime [Srok sluzhby avtomobilya] // Road Transport. 1983. No. 9. Pp. 9–11.
26. Chikurina N. V. Efficiency of leasing operations [Effektivnost' lizingovykh operatsiy] : Synopsis of PhD in Economics Thesis. Kazan, 1995. 21 p.

Объем статьи 0,8 авторских листа

УДК 656.13.06–047.74

**Владимир Анатольевич Бузин**, заместитель начальника Тюменского высшего военно-инженерного командного училища имени маршала инженерных войск А. И. Прошлякова (ТВВИКУ), Тюмень, Россия,  
**Николай Степанович Захаров**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сервис автомобилей и технологических машин» Тюменского индустриального университета (ТИУ), Тюмень, Россия,  
**Александр Эрнстович Александров**, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С УЧЕТОМ ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЕЙ

**Vladimir Anatolyevich Buzin**, Deputy Head of Tyumen Higher Military Engineering Command School named after Marshal of Engineering Troops A. I. Proshlyakov, Tyumen, Russia,

**Nikolay Stepanovich Zakharov**, DSc in Engineering, Professor, Head of Car Service and Technological Machinery Department, Tyumen Industrial University (TIU), Tyumen, Russia,

**Alexander Ernstovich Alexandrov**, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Organization of technical maintenance taking into account variations of vehicle operation intensity

#### Аннотация

Поток требований на техническое обслуживание (ТО) автомобилей, как правило, является нестационарным. Это обусловлено рядом случайных процессов, определяющих стохастичность приращения наработки автомобилей во времени. Поэтому традиционные методики планирования производственной программы по техническому обслуживанию автомобилей не обеспечивают достаточно точного результата. В таких случаях решение задачи возможно на основе имитационного моделирования.

В статье представлена имитационная модель потока требований на ТО, позволяющая определять количество технических обслуживаний по ступеням и их распределение во времени с учетом вариации интенсивности эксплуатации автомобилей.

Полученные результаты можно использовать при разработке методики определения потребности в материалах для технического обслуживания автомобилей с учетом изменения по времени интенсивности и условий их эксплуатации. Такая методика позволит оптимизировать объемы и периодичность поставок, а также рассчитывать размер страховых запасов.

**Ключевые слова:** техническое обслуживание автомобилей, поток требований на техническое обслуживание, интенсивность эксплуатации автомобилей, планирование, имитационная модель потока требований на техническое обслуживание.

#### Abstract

The flow of requirements for the technical maintenance of vehicles, as a rule, is non-stationary. This is due to a number of random processes which determine the stochasticity of the increment of the vehicle operating time. Therefore, traditional methods of planning a production program for technical maintenance of vehicles do not provide sufficiently accurate results. In such cases, the solution to this problem is possible on the basis of simulation modeling.

The article presents a simulation model of the flow of technical maintenance requirements, which allows determining the number of technical maintenance operations by stages and their distribution over time, taking into consideration variations in the intensity of vehicle operation.

The results obtained could be used in the development of the methodology for determining the needs for materials for technical maintenance of vehicles, with due consideration to changes in time intensity and their operation conditions. This technique would optimize the volume and frequency of deliveries, as well as calculate the amount of safety stocks.

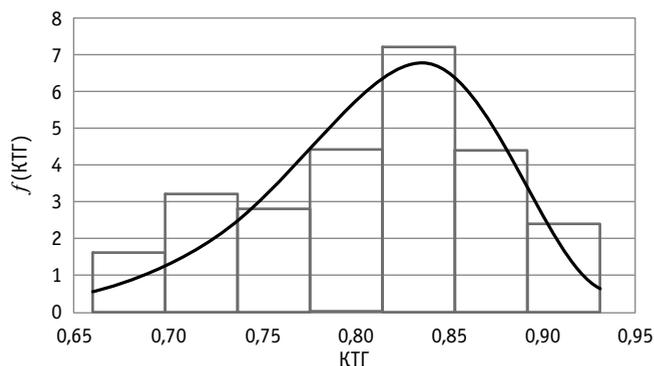
**Keywords:** technical maintenance of vehicles, flow of technical maintenance requirements, vehicle operation intensity, planning, simulation model of technical maintenance requirements.

#### ВВЕДЕНИЕ

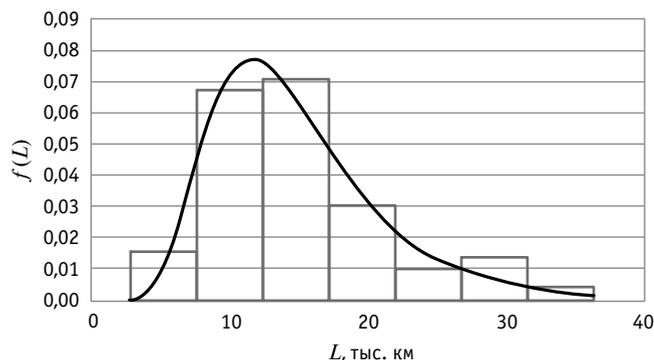
**Н**адежность, безопасность и эффективность функционирования транспортных систем в значительной мере определяются надежностью транспортных средств. Для ее обеспечения на автомобильном транспорте используется планово-предупредительная система технического обслуживания (ТО) и ремонта. При этом предполагается, что большая часть отказов должна быть предупреждена путем проведения операций периодического ТО, выполняемого через определенные интервалы наработки или времени. Однако на практике во многих случаях вероятность отказов существенно превышает значения, заложенные в системе обеспечения работоспособности автомобилей. Следствие этого — сверхнормативные простои автомобилей в текущем ремонте, низкие значения коэффициента технической готовности (рис. 1) и коэффициента использования парка.

Одна из причин низкой эксплуатационной надежности подвижного состава — несвоевременное выполнение ТО: в 40 % случаев фактическая периодичность ТО более чем на 10 % превышает нормативную (рис. 2).

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-60-65



**Рис. 1.** Распределение фактических значений коэффициента технической готовности (КТГ) для парков автомобилей предприятий технологического транспорта



**Рис. 2.** Распределение фактических значений периодичности ТО (норматив — 10 800 км)

Среди факторов, влияющих на фактическую периодичность, необходимо выделить систему планирования постановки автомобилей на ТО [1–4], обеспеченность постами обслуживания [5, 6], персоналом, запасными частями и материалами [7], технологическую дисциплину, среднюю длину рейсов подвижного состава [8], вариацию интенсивности эксплуатации [2, 8].

Большинство методик планирования потребности автомобильного парка в ТО ограничивается расчетом годовой производственной программы [3, 5, 9], а месячные программы по ТО определяют исходя из годовых. Календарное планирование ТО осуществляется путем равномерного распределения месячной программы по рабочим сменам [1]. При этом достаточная точность расчетов обеспечивается только при постоянной интенсивности эксплуатации подвижного состава. В работах [2] и [6] представлены имитационные модели для определения потребности в ТО с учетом вариации интенсивности эксплуатации. Но в этих моделях рассматриваются только двухступенчатые структуры циклов ТО.

В статье описывается модель потока требований на обслуживание, учитывающая не только вариацию интенсивности эксплуатации автомобилей, но и все многообразие структур циклов ТО.

## МЕТОДЫ

В настоящее время для находящихся в эксплуатации автомобилей предусмотрены системы ТО, которые можно разделить на условно одноступенчатые и условно двухступенчатые [10–13]. При условно одноступенчатых циклах все периодические обслуживания проводятся через одинаковый интервал наработки или времени (табл. 1), но каждое обслуживание имеет определенный перечень операций, отличный от других обслуживаний в цикле. Например, у автомобилей «ВАЗ-2110» для разных обслуживаний нормативная трудоемкость ТО в цикле меняется от 2,62 до 8,27 чел.-ч, а у автобусов IVECO DAILY — от 4,03 до 6,68 чел.-ч. Поэтому структуру цикла можно назвать одноступенчатой только условно исходя из равенства периодичностей обслуживания между двумя последовательными ТО.

При условно двухступенчатых циклах перечень операций обслуживания внутри одного цикла также меняется. Например, для автомобилей «Урал-4320» предусмотрено проведе-

Таблица 1

Примеры циклов ТО при одноступенчатой структуре

Идентификационный номер обслуживания	Идентификаторы ТО для автомобилей	
	«ВАЗ-2110»	IVECO DAILY
1	ТО-15	ТО-20
2	ТО-30	ТО-40
3	ТО-45	ТО-60
4	ТО-60	ТО-80
5	ТО-75	ТО-100
6	ТО-90	ТО-120
7	–	ТО-140
8	–	ТО-160
9	–	ТО-180
10	–	ТО-200
Всего количество обслуживаний в цикле	6	10

ние ТО-1 с периодичностью 4 тыс. км, а также ТО-2 — через 16 тыс. км (табл. 2). Но при этом перечни операций четных и нечетных ТО-1 существенно отличаются, все ТО-2, за исключением ТО-2-2 и ТО-2-5, также имеют разные перечни, и для их проведения необходимы разные наборы запасных частей и расходных материалов.

Таким образом, используемые в настоящее время системы ТО отличаются сложностью циклов. Поэтому планирование производственной программы, а также организация снабжения материалами для ТО — сложная задача. С учетом нестационарности потока требований на проведение ТО, обусловленной случайностью процесса приращения наработки автомобилей по времени, целесообразно при решении этой задачи использовать имитационное моделирование.

Имитационные модели используются при изучении систем тогда, когда с помощью аналитической модели невозможно получить нужный результат. Поскольку закономерности, формирующие поток требований на ТО, являются стохастическими,

то и изучаемая система является стохастической. Поэтому детерминированный подход определяет только средние значения количества ТО за достаточно большой промежуток времени, но не позволяет оценить вариацию числа технических воздействий. Единственный возможный вариант решения рассматриваемой задачи — использование метода Монте-Карло для моделирования закономерностей формирования наработок автомобилей, а также фактических периодичностей ТО. Такой подход реализуется в имитационных моделях.

Таблица 2

Пример цикла ТО при двухступенчатой структуре

Идентификационный номер обслуживания	Идентификаторы ТО для автомобилей «Урал-4320»
1	ТО-1-1
2	ТО-1-2
3	ТО-1-1
4	ТО-2-1
5	ТО-1-1
6	ТО-1-2
7	ТО-1-1
8	ТО-2-2
9	ТО-1-1
10	ТО-1-2
11	ТО-1-1
12	ТО-2-3
13	ТО-1-1
14	ТО-1-2
15	ТО-1-1
16	ТО-2-4
17	ТО-1-1
18	ТО-1-2
19	ТО-1-1
20	ТО-2-5
21	ТО-1-1
22	ТО-1-2
23	ТО-1-1
24	ТО-2-6
Всего количество обслуживаний в цикле	24

### ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Процесс функционирования модели предусматривает:

фиксацию наработок каждого автомобиля на начало прогнозного периода, а также вида последнего выполненного ТО и наработки, при которой оно выполнено;

последующее прогнозирование приращений наработок по каждому автомобилю за сутки;

проверку достижения наработки до очередного ТО; подсчет прогнозируемых технических воздействий.

Наработка каждого автомобиля на начало прогнозного периода может быть описана двумя способами. Первый — это представление наработок в виде массива чисел  $L_i$  для  $N$  автомобилей, т.е.  $L_1, L_2, \dots, L_N$ . Достоинство такого способа задания исходных данных — простота, недостатки — высокая трудоемкость ручного ввода при большом размере парка автомобилей и невозможность получить точные данные, если начало прогнозного периода еще не наступило.

Второй способ — задание распределения наработок: вид закона распределения, параметры закона распределения. Достоинство — относительно низкая трудоемкость ввода исходных данных, недостаток — низкая точность при малом размере парка автомобилей.

Наработка каждого автомобиля при последнем ТО также может быть представлена двумя способами. Первый — по фактическим значениям для автомобилей рассматриваемого предприятия в виде массива чисел. Достоинство такого способа задания исходных данных — простота и точность, недостаток — высокая трудоемкость ручного ввода при большом размере парка автомобилей.

Второй способ — задание значений этого показателя распределением через вид закона и его параметры. Достоинство способа — малая трудоемкость, недостаток — низкая точность при небольшом размере парка автомобилей, а также при высоких значениях периодичности ТО.

Для определения вида очередного ТО необходим идентификатор типа последнего ТО. При создании кода программной реализации имитационной модели самый удобный способ идентификации — обозначение вида ТО соответствующим порядковым номером (см. табл. 1 и 2).

Фактические периодичности ТО могут существенно отличаться от нормативных. Так, по данным А. Н. Макаровой, величина отклонения фактических периодичностей от нормативных зависит от средней длины рейса, технологической дисциплины и пропускной способности зоны ТО [8].

Ранее было установлено, что фактическая периодичность ТО распределена по нормальному или логнормальному закону [2, 6]. Поэтому для получения в модели значений рассматриваемой величины нужно использовать генератор случайных чисел. Исходные данные для генерирования — средняя периодичность ТО и коэффициент вариации.

Фактические интенсивности эксплуатации по каждому автомобилю генерируются на каждом шаге моделирования. Исходя из средней интенсивности эксплуатации рассчитывается периодическая компонента с использованием полигармонической модели [7]. Случайная компонента генерируется с помощью датчика случайных чисел. В качестве исходных данных при моделировании фактических интенсивностей эксплуатации можно использовать параметры гармонической модели для расчета периодической компоненты и параметры закона распределения для случайной компоненты. Параметры гармонической модели рассчитываются заранее исходя из фактических данных об интенсивности эксплуатации, либо эти данные вводятся в модель и обрабатываются в процессе моделирования.

Укрупненный алгоритм имитационной модели потока требований на ТО представлен на рис. 3. Работа модели предусматривает реализацию следующих шагов.

1. Ввод исходных данных:  
время начала моделирования;  
время окончания моделирования;  
шаг приращения времени;  
количество автомобилей в парке;  
средний годовой пробег автомобилей;  
нормативные периодичности ТО по ступеням, км;

наработку каждого автомобиля после очередного ТО;  
время, прошедшее после очередного ТО каждого автомобиля;  
количество ступеней ТО;  
номер ступени очередного ТО по каждому автомобилю;

численные значения параметров математической модели влияния времени на интенсивность эксплуатации;

численные значения параметров распределения интенсивности эксплуатации (случайная компонента);

численные значения параметров распределения фактических периодичностей ТО.

2. Открытие цикла  $T$  с параметрами: время начала моделирования  $T_{Н}$ ; время окончания моделирования  $T_{К}$ ; шаг приращения времени  $\Delta T$ .

3. Открытие цикла  $A$  с параметрами: начальное значение  $A = 0$ ; шаг  $A$  равен 1; условие окончания цикла  $A = A_c$ .

4. Генерирование интенсивности эксплуатации автомобиля  $l$ .

5. Расчет наработки автомобиля за время  $\Delta T$ :  $\Delta L = l \Delta T$ .

6. Расчет наработки автомобиля после последнего ТО:  $L = L + \Delta L$ .

7. Генерирование фактической периодичности технического обслуживания:  $L_{ТО}$ .

8. Проверка условия достижения автомобилем наработки до очередного ТО:  $L < L_{ТО}$ . Если суммарная наработка достигает предельного значения, при котором нужно проводить ТО, производится переход к пункту 10, в противном случае — к пункту 9.

9. Проверка условия достижения времени очередного ТО:  $T < T_{ТО}$ . Если время очередного ТО не достигнуто, то осуществляется переход к пункту 14, в ином случае — к пункту 10.

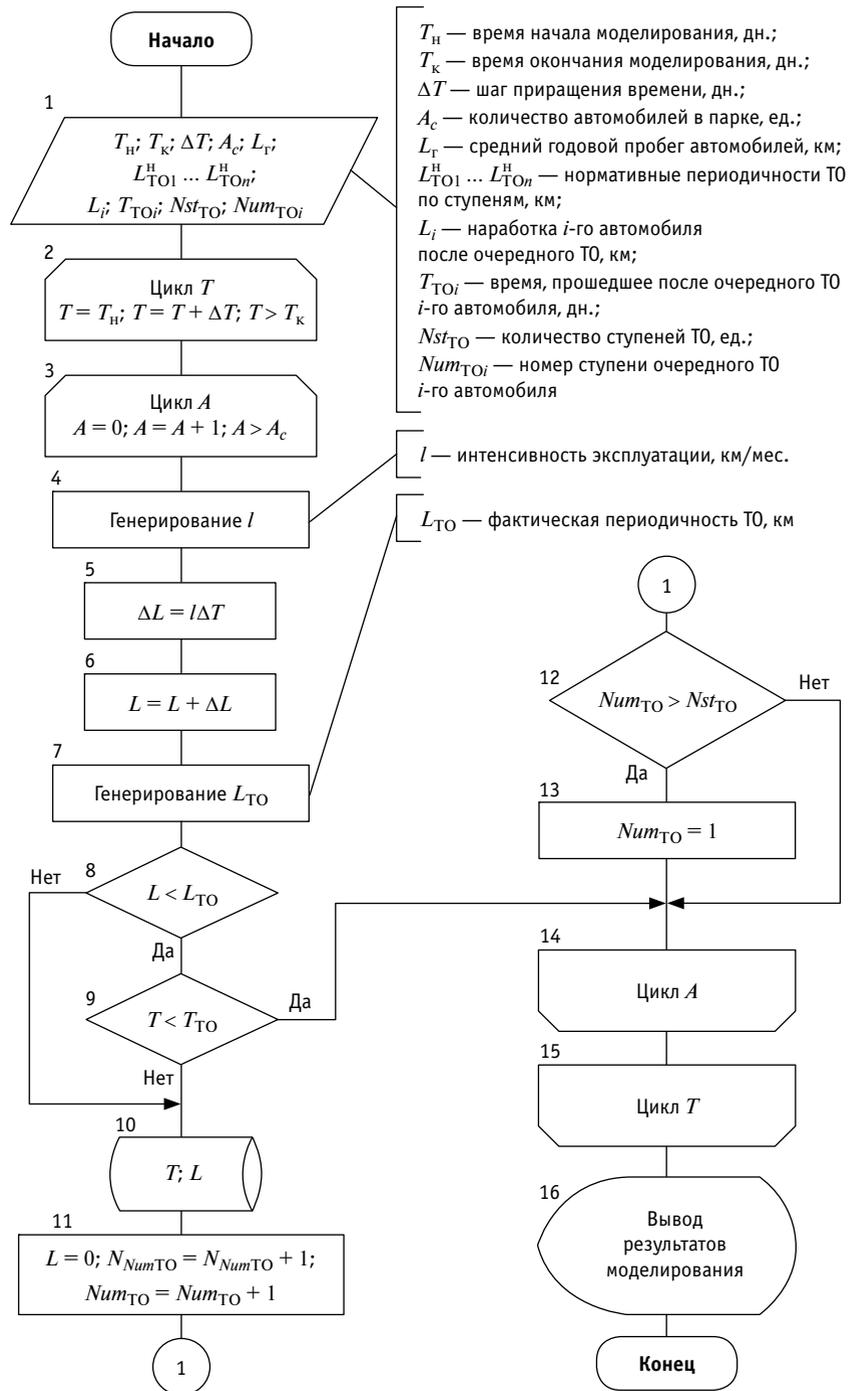


Рис. 3. Укрупненный алгоритм модели потока требований на ТО

10. Фиксация проведения очередного ТО для данного автомобиля, запись значений времени и наработки, при которых проводится техническое воздействие.

11. Обнуление наработки после очередного ТО, увеличение количества ТО данной ступени на единицу, увеличе-

ние номера очередной ступени ТО также на единицу.

12. Проверка достижения конца цикла ТО. Если текущий номер ступени ТО превышает количество ТО в цикле, то осуществляется переход к пункту 13, в ином случае — к пункту 14.

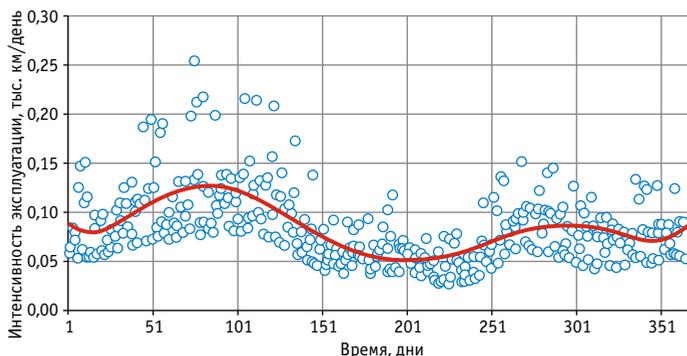


Рис. 4. Результаты генерирования интенсивности эксплуатации автомобилей

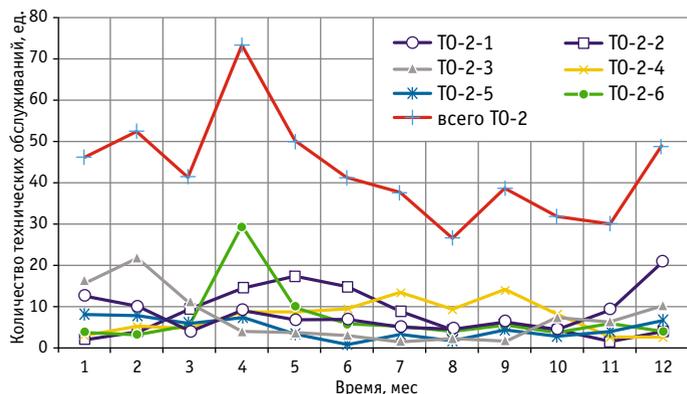


Рис. 5. Результаты моделирования количества требований на техническое обслуживание автомобилей «Урал-4320»

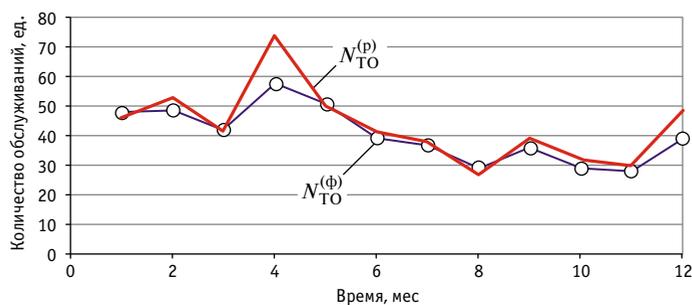


Рис. 6. Сравнение расчетных  $N_{ТО}^{(p)}$  и фактических  $N_{ТО}^{(ф)}$  значений количества ТО

Таблица 3

Результаты оценки адекватности имитационной модели потока требований на ТО в условиях вариации интенсивности эксплуатации автомобилей

Предприятие	Количество автомобилей	$\varepsilon$	$D$	$D_{ост}$	$F$	$F_{0,95}$
УТТ НГДУ КН	286	7,99	91,36	18,04	5,06	2,69
ТУТТ-1	106	9,45	182,00	4,68	38,9	2,69
УТТ НГДУ БН	580	6,87	112,32	15,67	7,16	2,69

13. Присвоение текущему номеру очередной ступени ТО значения, равного единице.

14. Проверка достижения конца цикла  $A$ . Если текущий номер автомобиля не достиг предельного значения, то выполняется возврат к пункту 3, в противном случае — переход к пункту 15.

15. Проверка достижения конца цикла  $T$ . Если текущее время не достигло момента окончания моделируемого периода, то осуществляется возврат к пункту 2, в противном случае — переход к пункту 16.

16. Вывод результатов моделирования: количество ТО каждой ступени в единицу времени, фактические наработки на ТО. Переход к завершению работы модели.

### ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ

Оценка адекватности модели заключалась в моделировании месячного числа ТО для автомобилей конкретного предприятия и сравнении с фактическими значениями. Данные об интенсивности эксплуатации автомобилей по месяцам, а также о фактическом количестве ТО по месяцам получены в транспортных подразделениях ПАО «Сургутнефтегаз». Планирование эксперимента заключалось в расчете количества реализаций расчетов на имитационной модели, обеспечивающих заданную точность и достоверность. Сравнение выполнено по трем предприятиям: Управлению технологического транспорта Нефтегазодобывающего управления «Комсомольскнефть» (УТТ НГДУ КН), Талаканскому управлению технологического транспорта № 1 (ТУТТ-1) и Управлению технологического транспорта Нефтегазодобывающего управления «Быстринскнефть» (УТТ НГДУ БН). Пример генерирования дневной интенсивности эксплуатации автомобилей показан на рис. 4, результаты моделирования количества ТО представлены на рис. 5.

Расчетные значения числа ТО сравнивали с фактическими (рис. 6). Для количественной оценки соответствия расчетных и фактических значений использовали среднюю ошибку аппроксимации  $\varepsilon$  и дисперсионное отношение Фишера  $F$ .

Как показали расчеты, значение средней ошибки аппроксимации находится в пределах 6,87–9,45 %, а дисперсионное отношение Фишера (отношение дисперсии количества обслуживаний  $D$  к остаточной дисперсии модели  $D_{ост}$ ) во всех случаях превышает табличное значение критерия Фишера с вероятностью не менее 0,95 (табл. 3).

Таким образом, подтверждена адекватность рассматриваемой имитационной модели.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Поток требований на ТО в основном является нестационарным, что обусловлено рядом случайных процессов, определяющих стохастичность приращения наработки автомобилей во времени. Соответственно традиционные методики планирования производственной программы по ТО автомобилей не дают достаточно точного результата. В подобных случаях решить задачу планирования и организации ТО возможно при помощи имитационного моделирования.

Разработанная имитационная модель потока требований на ТО позволяет определять количество технических обслуживаний по ступеням и их распределение во времени с учетом вариации интенсивности эксплуатации автомобилей. Как показала оценка фактических и рассчитанных значений количества ТО, адекватность модели имеет вероятность не ниже 0,95. Средняя ошибка аппроксимации находится в пределах 6,87–9,45 %.

Полученные результаты можно использовать при разработке методики определения потребности в материалах для ТО с учетом изменения по времени интенсивности и условий эксплуатации автомобилей. Такая методика позволит оптимизировать объемы и периодичность поставок, а также рассчитывать размер страховых запасов материалов с учетом сезонной вариации интенсивности и условий эксплуатации автомобилей.

## Литература

1. Бедняк М. Н. Моделирование процессов технического обслуживания и ремонта автомобилей. Киев : Вища школа, 1983. 131 с.
2. Захаров Н. С., Довбня Б. Е. Имитационный метод расчета производственной программы предприятий по техническому обслуживанию автомобилей // Пути совершенствования технической эксплуатации и ремонта машин АТК : тезисы докладов Международного научно-практического семинара. Владимир : ВлГУ, 1997. С. 6–7.
3. Карташов В. П. Методы технического обслуживания автомобилей. Саратов : Приволжское книжное издательство, 1964. 204 с.
4. Кирсанов Е. А., Шейнин А. М. Вероятностный метод расчета постов текущего ремонта автомобилей // Вопросы технического обслуживания и ремонта автомобилей. Москва : ЦБНТИ Минавтотранса РСФСР, 1971. № 18. С. 43–53.
5. Напольский Г. М. Технологическое проектирование автотранспортных предприятий и станций технического обслуживания. Москва : Транспорт, 1993. 272 с.
6. Шевелев Е. С. Определение параметров зоны технического обслуживания с учетом неравномерности поступления автомобилей : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тюмень, 2009. 154 с.
7. Захаров Н. С., Абакумов Г. В., Вознесенский А. В. Влияние сезонных условий на расходование ресурсов при эксплуатации автомобилей. Тюмень : ТюмГНГУ, 2011. 115 с.
8. Макарова А. Н. Методика оперативного корректирования нормативов периодичности технического обслуживания с учетом фактических условий эксплуатации автомобилей : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Оренбург, 2016. 208 с.
9. ОНТП-01-91. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий автомобильного транспорта. Москва : Росавтотранс, 1991. 183 с.
10. Автомобили «Урал-4320-10», «Урал-4320-31» и их модификации. Руководство по эксплуатации 4320-3902035 РЕ. URL: <http://www.aversauto.ru/rukovodstvo/page141> (дата обращения: 10.03.2023).
11. Техническое обслуживание КАМАЗ. URL: <http://kamaz.ru/purchase-and-services/services/service/> (дата обращения: 10.03.2023).
12. График ТО. Группа компаний «Траксервис» — официальный сервисный партнер MAN NUTZFAHRZEUGE. URL: <http://www.man-ts.ru/service/tech-serv/> (дата обращения: 10.03.2023).
13. DAILY. Эксплуатация и техническое обслуживание. Нижний Новгород : ООО «СТ Нижегородец», 2011. 428 с.

## References

1. Bednyak M. N. Modeling of vehicle maintenance and repair processes [Modelirovanie protsessov tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta avtomobilye]. Kiev : Higher School, 1983. 131 p.
2. Zakharov N. S., Dovbnya B. E. Simulation method for calculating a production program of vehicle technical maintenance enterprises [Imitatsionnyy metod rascheta proizvodstvennoy programmy predpriyatiy po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu avtomobilye] // Ways to improve the technical operation and repair of ATC machines : theses of the reports of the International scientific and practical seminar. Vladimir : VLSU, 1997. Pp. 6–7.
3. Kartashov V. P. Methods for technical maintenance of vehicles [Metody tekhnicheskogo obsluzhivaniya avtomobilye]. Saratov, 1964. 204 p.
4. Kirsanov E. A., Sheynin A. M. Probabilistic method for calculating vehicle current maintenance posts [Veroyatnostnyy metod rascheta postov tekushhego remonta avtomobilye] // Problematic issues of vehicle maintenance and repair. Moscow : Central Bureau for Scientific and Technical Information of Ministry of Transport of the RSFSR, 1971. No. 18. Pp. 43–53.
5. Napol'skiy G. M. Technological design of motor transport enterprises and technical maintenance stations [Tekhnologicheskoe proektirovanie avtotransportnykh predpriyatiy i stantsiy tekhnicheskogo obsluzhivaniya]. Moscow : Transport, 1993. 272 p.
6. Shevelev E. S. Determination of the parameters of technical maintenance area, taking into account the uneven arrivals of vehicles [Opredelenie parametrov zony tekhnicheskogo obsluzhivaniya s uchedom neravnomernosti postupleniya avtomobilye] : PhD in Engineering Thesis. Tyumen, 2009. 154 p.
7. Zakharov N. S., Abakumov G. V., Voznesenskiy A. V. The impact of seasonal conditions on the consumption of resources during vehicle operation [Vliyaniye sezonnykh usloviy na raskhodovanie resursov pri ekspluatatsii avtomobilye]. Tyumen : Tyumen State Oil and Gas University, 2011. 115 p.
8. Makarova A. N. The methodology of operational adjustment of technical maintenance frequency standards taking into consideration the actual operating conditions of vehicles [Metodika operativnogo korrektsirovaniya normativov periodichnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya s uchedom fakticheskikh usloviy ekspluatatsii avtomobilye] : PhD in Engineering Thesis. Orenburg, 2016. 208 p.
9. AUSTD-01-91. All-Union standards for technological design of automobile transport enterprises [ONTP-01-91. Obshhesoyuznyye normy tekhnologicheskogo proektirovaniya predpriyatiy avtomobil'nogo transporta]. Moscow : Rosavtotrans, 1991. 183 p.
10. «Ural-4320-10», «Ural-4320-31» vehicles and their modifications. User Manual 4320-3902035 RE [Avtomobili «Ural-4320-10», «Ural-4320-31» i ikh modifikatsii. Rukovodstvo po ekspluatatsii 4320-3902035 RE]. URL: <http://www.aversauto.ru/rukovodstvo/page141> (access date: 10.03.2023).
11. KAMAZ technical maintenance [Tekhnicheskoe obsluzhivanie KAMAZ]. URL: <http://kamaz.ru/purchase-and-services/services/service/> (access date: 10.03.2023).
12. Technical maintenance schedule. «Truckservice» Group of Companies — official service partner MAN NUTZFAHRZEUGE [Grafik TO. Gruppy kompaniy «Trakservis» — ofitsial'nyy servisnyy partner MAN NUTZFAHRZEUGE]. URL: <http://www.man-ts.ru/service/tech-serv/> (access date: 10.03.2023).
13. DAILY. Operation and technical maintenance [DAILY. Ekspluatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie]. Nizhniy Novgorod : «SPM Nizhegorodets» LLC, 2011. 428 p.

УДК 656.132

**Дмитрий Германович Неволин, доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,**  
**Алексей Алексеевич Цариков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,**  
**Виктор Григорьевич Бондаренко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия**

## СУЩЕСТВУЮЩИЕ МОДЕЛИ ОРГАНИЗАЦИИ МАРШРУТОВ СКОРОСТНОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ВРЕМЯ ПОЕЗДКИ ПАССАЖИРА

**Dmitriy Germanovich Nevolin, DSc in Engineering, Professor, Design and Operation of Automobiles Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,**  
**Alexey Alexeevich Tsarikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Design and Operation of Automobiles Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,**  
**Viktor Grigoryevich Bondarenko, PhD in Engineering, Associate Professor, Design and Operation of Automobiles Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia**

### Existing models of organizing high-speed public transport routes and their impact on passenger travel time

#### Аннотация

В настоящее время в отечественной научной литературе отсутствуют исследования, посвященные моделям организации маршрутов скоростного пассажирского транспорта. Вместе с тем, как показывает практика, время перемещения пассажиров существенно зависит от принятой системы организации маршрутов. Например, беспересадочные маршруты, с одной стороны, увеличивают необходимый объем подвижного состава, используемого при перевозке пассажиров, но, с другой стороны, снижают общее время пересадок.

В статье выполнен анализ подходов к организации маршрутов на сети скоростного пассажирского транспорта и представлен расчет накладного времени поездки пассажиров для разных вариантов сети. Отдельно приведены расчеты скорости сообщения пассажира в зависимости от дальности поездки и вида используемого транспорта.

Показано, что оптимальный выбор модели маршрутной сети городского пассажирского транспорта позволяет снизить затраты на строительство инфраструктуры и улучшить качество обслуживания населения.

**Ключевые слова:** городской пассажирский транспорт, маршрутная сеть, транспортная система города, скоростной транспорт, проектирование маршрутов.

#### Abstract

Currently, there are no studies in the Russian scientific literature devoted to models of the organization of high-speed passenger transport routes. At the same time, as practice proves, the time of movement of passengers significantly depends on the accepted system of organization of routes. For example, non-stop routes, on the one hand, increase the required volume of rolling stock used for passenger transportation, but, on the other hand, reduce the total transshipment time.

The article analyzes approaches to the organization of routes on the high-speed passenger transport network and presents the calculation of the overhead travel time of passengers for different network options. Calculations of the passenger's traffic speed are given separately, depending on the distance of a trip and the type of transport used.

It is pointed out that the optimal choice of the model of the route network of urban passenger transport makes it possible to reduce the cost of infrastructure construction and improve the quality of public services.

**Keywords:** urban passenger transport, route network, city transport system, high-speed transport, route design.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-66-70

#### ВВЕДЕНИЕ

За последние 30–35 лет рост автомобилизации в крупных и крупнейших городах Российской Федерации негативно сказался на уровне обслуживания транспортных систем. Одновременно с увеличением количества заторов и их протяженности обострились проблемы безопасности дорожного движения. Первоначально центральные, а затем и периферийные районы стали испытывать затруднения от транспортных заторов. Чтобы предотвратить транспортный коллапс, в крупных и крупнейших городах России необходимо развивать скоростные виды общественного транспорта.

Одна из важнейших задач, которую нужно решать при использовании скоростного пассажирского транспорта, — организация пересадок между линиями. Иногда пассажиру, для того чтобы переместиться из одной точки города в другую, необходимо сделать несколько пересадок, что требует значительного времени на перемещение между маршрутами и, как следствие, увеличивает длительность поездки.

Расчеты и исследования, проведенные отечественными специалистами, показали, что время поездки в подвижном составе общественного транспорта может составлять 25–35 % от полных затрат времени перемещения [1]. Остальные затраты связаны с подходами к остановкам (станциям), ожиданием подвижного состава, пересадками, перемещением внутри станции. Совокупность таких затрат называется накладными затратами времени поездки.

Проблемой высокой доли накладного времени поездки отечественные ученые занимались еще в 1980-е гг. [1–3]. В частности, они отмечали, что при пользовании городским пассажирским транспортом высокая доля накладных расходов времени отрицательным образом сказывается на скорости перемещения пассажиров. Пересадки, связанные с большими затратами времени на переходы между станциями и внутри них, примерно вдвое снижают скорость сообщения пассажира по сравнению со скоростью сообщения подвижного состава. Как отмечено в работе [4], в метро скорость поездки из одного пункта города в другой на маршруте с одной пересадкой составляет 16–18 км/ч, а с двумя пересадками 12–14 км/ч. Более подробно этот вопрос рассмотрен в работе [5].

Учитывая вышесказанное, авторы статьи поставили перед собой цель проанализировать виды скоростного пассажирского транспорта и подходы к организации их маршрутов.

## ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ МАРШРУТОВ

На территории постсоветского пространства и в Восточной Европе широкое распространение получила модель скоростного пассажирского транспорта в виде схемы «одна линия — один маршрут». Обычно это системы метрополитена, в которых большая часть линии проходит под землей и на линии используется только один маршрут. Но в подобных системах может быть и несколько линий, включая кольцевые.

Пересадка с одной линии на другую, а одновременно с этим и пересадка на другой маршрут требует перемещения со станции на станцию через подземный переход. В Московском метрополитене такая пересадка в зависимости от станции может занимать от 2 до 10 мин, что значительно увеличивает время поездки.

Вместе с тем модель организации маршрутов скоростного транспорта по схеме «одна линия — один маршрут» эффективна только для крупных мегаполисов, население которых превышает 5 млн жителей. Именно для таких городов характерны экономически эффективные для организации метрополитена пассажиропотоки. По этой причине города Российской Федерации с численностью населения менее 2 млн жителей столкнулись с проблемой развития метрополитенов [6]. Иными словами, те технологии и модели, которые до этого показали себя крайне эффективно в Москве и Санкт-Петербурге, не дали подобного результата, например, в Самаре и Нижнем Новгороде.

Следующая модель, которую широко используют при организации скоростного пассажирского транспорта, можно назвать «одна линия — несколько маршрутов». К ней относятся и системы скоростного трамвая, и системы метрополитена.

Суть модели — организовать движение нескольких маршрутов так, чтобы они имели общий участок сети, по которому проходили бы все маршруты (обычно это центральная часть города). Скоростные системы, организованные в соответствии с данной моделью, могут иметь несколько линий, пересадка между которыми требует перемещения пассажира с одной станции на другую. При этом на каждой отдельной линии скоростного пассажирского транспорта может быть организовано от 2 до 5 маршрутов. Стоит отметить, что пересадка с маршрута на маршрут внутри одной линии осуществляется с платформы одной станции и занимает меньше время, чем переход на другую линию.

В мировой практике есть примеры скоростных систем пассажирского транспорта, в которых разделение на отдельные изолированные линии отсутствует. Такие системы имеют общую сеть скоростного транспорта, по ним можно организовывать маршруты в любом виде и по любой траектории. Авторы статьи назвали эту модель «свободная схема». Подобная модель используется в любом городе Российской Федерации для наземных видов пассажирского транспорта, прежде всего для автобусов. Иными словами, на городской улично-дорожной сети по любой траектории движения можно организовать маршрут общественного транспорта, который свяжет любые две точки города.

Необходимо отметить, что при обслуживании скоростных систем подобного типа требуется большое число маршрутов и подвижного состава. Например, в столице Колумбии Боготе используется свыше 100 маршрутов скоростного автобуса, на которых эксплуатируется около 2000 автобусов особо большого класса [7].

Помимо вышеперечисленных моделей, необходимо отдельно выделить системы, построенные по смешанной схеме. Ярким примером подобной системы является нью-йоркское метро. Здесь на отдельных линиях может быть организован один или несколько маршрутов, однако существуют маршруты, которые проходят через несколько линий. Именно такая схема построения маршрутов отличает ее от вышеперечисленных.

Анализ различных моделей организации маршрутов городского скоростного пассажирского транспорта позволил авторам составить табл. 1.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАКЛАДНЫХ ЗАТРАТ И СКОРОСТИ ПОЕЗДКИ Пассажира

Выбор модели организации маршрутов, а также самого вида скоростного пассажирского транспорта зависит от большого числа показателей. Сюда необходимо отнести прогнозируемые пассажиропотоки, среднюю дальность поездки пассажира, конфигурацию улично-дорожной сети, а также форму освоения территории города [8, 9].

Различные модели организации маршрутов на сети скоростного пассажирского транспорта требуют разного числа пересадок и разного времени на их осуществление. Проведем приблизительные инженерные расчеты по накладным затратам времени поездки при использовании моделей организации маршрутов.

Таблица 1

Основные различия систем городского скоростного пассажирского транспорта с точки зрения построения маршрутов

Модели	Линии	Маршруты	Пересадки
Одна линия — один маршрут	Линии изолированы друг от друга	Маршруты изолированы друг от друга	Необходимы переходы с одной линии на другую
Одна линия — несколько маршрутов	Линии изолированы друг от друга	Маршруты одной линии совмещены, маршруты разных линий изолированы	Внутри одной линии пересадки осуществляются с одной платформы, пересадки с разных линий требуют перехода
Свободная схема	Система построена в рамках общей сети	Маршруты на всей сети совмещены	Пересадки не требуются
Смешанная схема	Некоторые линии изолированы, некоторые совмещены	Маршруты одной линии совмещены, однако есть маршруты, которые проходят по разным линиям	Внутри одной линии пересадки осуществляются с одной платформы, пересадки с разных линий требуют перехода

Для расчета общего времени передвижения пассажира на сети используем универсальную формулу [10]

$$T_{\text{п}} = t'_{\text{пеш}} + 0,5t_{\text{и.у}}\varepsilon_{\text{р.у}} + \frac{l_{\text{у}}}{v_{\text{с.у}}} + (t_{\text{пер}} + 0,5t_{\text{и.ск}}\varepsilon_{\text{р.ст}}) + \frac{l_{\text{ск}}}{v_{\text{с.ск}}} + t''_{\text{пеш}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{п}}$  — общее время перемещения пассажира от двери до двери с учетом подхода к остановочным пунктам, мин;

$t'_{\text{пеш}}$  — затраты времени на подход от дома до остановки городского пассажирского транспорта, мин;

$t_{\text{и.у}}$  — интервал движения подвижного состава подвозящего вида транспорта, мин;

$\varepsilon_{\text{р.у}}$  — коэффициент нерегулярности движения подвозящего вида транспорта;

$l_{\text{у}}$  — расстояние передвижения на подвозящем виде транспорта, км;

$v_{\text{с.у}}$  — скорость сообщения подвозящего вида транспорта, км/мин;

$t_{\text{пер}}$  — затраты времени на пешеходные перемещения от остановки подвозящего вида транспорта до станции скоростного пассажирского транспорта, мин;

$t_{\text{и.ск}}$  — интервал движения подвижного состава скоростного вида транспорта, мин;

$\varepsilon_{\text{р.ст}}$  — коэффициент нерегулярности движения скоростного вида транспорта;

$l_{\text{ск}}$  — расстояние передвижения на скоростном виде транспорта, км;

$v_{\text{с.ск}}$  — скорость сообщения скоростного вида транспорта, км/мин;

$t''_{\text{пеш}}$  — затраты времени на пешеходный подход от станции скоростного вида транспорта до двери точки поездки, мин.

Необходимо отметить, что в своем расчете мы не используем данные по подвозящему транспорту, а также временные характеристики подхода от дома до остановки общественно-городского транспорта. Поэтому видоизменяем формулу (1) под перемещения только на скоростном пассажирском транспорте:

$$T_{\text{п.ст}} = t'_{\text{сп}} + (0,5t'_{\text{и.ск}}\varepsilon_{\text{р.ст}}) + \frac{l_{\text{ск}}}{v_{\text{с.ск}}} + t'_{\text{пер}} + t'_{\text{пд}} + (0,5t''_{\text{и.ск}}\varepsilon_{\text{р.ст}}), \quad (2)$$

где  $T_{\text{п.ст}}$  — общее время перемещения пассажира по сети скоростного транспорта, мин;

$t'_{\text{сп}}$  — время спуска пассажира на станцию скоростного транспорта, мин;

$t'_{\text{и.ск}}$  — интервал движения подвижного состава скоростного вида транспорта первой линии, мин;

$t''_{\text{и.ск}}$  — интервал движения подвижного состава скоростного вида транспорта второй линии, мин;

$t'_{\text{пер}}$  — время перехода с одной линии скоростного транспорта на другую, мин;

$t'_{\text{пд}}$  — время подъема пассажира со станции скоростного транспорта на поверхность, мин.

Для расчета доли накладных затрат времени используем формулу

$$d_{\text{н.в}} = \frac{l_{\text{ск}}}{v_{\text{с.ск}}} / T_{\text{п.ст}}, \quad (3)$$

где  $d_{\text{н.в}}$  — доля накладных затрат времени при поездке пассажира на скоростном городском транспорте, %.

Все расчеты проведены по четырем вариантам скоростной сети.

Вариант № 1. Скоростная сеть метрополитена, построенная в соответствии с моделью «одна линия — один маршрут». Скорость сообщения подвижного состава  $v_{\text{с.ск}} = 40$  км/ч. Время спуска на станцию метро и подъема с нее принято равным 5 мин, время перехода с одной линии на другую — 3 мин.

Вариант № 2. Скоростная сеть метрополитена, построенная по модели «одна линия — несколько маршрутов». Скорость сообщения подвижного состава  $v_{\text{с.ск}} = 40$  км/ч. Время спуска на станцию метро и подъема с нее принято равным 5 мин. В данном варианте пересадка с маршрута на маршрут осуществляется с одной станции.

Вариант № 3. Сеть скоростного трамвая, построенная в соответствии с моделью «одна линия — несколько маршрутов». Скорость сообщения подвижного состава  $v_{с.ск} = 25$  км/ч. Время спуска в подземные станции и подъема с них принято равным 3 мин, время перехода с одной линии на другую — 3 мин.

Вариант № 4. Сеть скоростного автобуса, построенная по модели «свободная схема организации маршрутов». Скорость сообщения подвижного состава  $v_{с.ск} = 25$  км/ч. Время перехода к станции скоростного автобуса через пешеходный переход принято равным 2 мин. Пересадок с одного маршрута на другой нет.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Скоростные сети, организованные по вариантам № 1 и № 2, имеют достаточно высокую долю накладных затрат времени (рис. 1). Так, при поездке на расстояние 3 км пассажир перемещается внутри системы или ожидает подвижной состав 76 % времени и только 24 % времени передвигается в вагоне метро. Даже при поездке на расстояние в 10 км время, которое пассажир проводит внутри вагона, составляет 50 % от общего времени перемещения.

При использовании скоростного трамвая (вариант № 3) накладные затраты времени на 15 % меньше, чем при поездке в метро. Это связано с наличием наземных станций, а также с неглубоким заложением подземных линий. Однако и в данном варианте при поездке на расстояние в 10 км доля накладных расходов времени достигает 32 %.

Сеть скоростного автобуса (вариант № 4) организована по наземным линиям, поэтому длительных спусков под землю, как в метрополитене, здесь нет. Однако при коротких поездках на скоростном автобусе доля накладных расходов времени тоже может достигать 30–40 %.

Необходимо отметить, что высокая доля накладных расходов при поездке в скоростном транспорте отрицательно влияет на объем перевезенных пассажиров. То есть любая скоростная система не будет использоваться пассажирами городского транспорта, если средняя скорость сообщения уличных видов транспорта выше. Подобная ситуация возможна в тех случаях, когда средняя дальность поездки незначительна и составляет всего 3–5 км.

Учитывая вышесказанное, авторы рассчитали для всех четырех вариантов среднюю скорость сообщения в зависимости от дальности поездки по формуле

$$v_{cp} = l_{ск} / T_{п.ст} \quad (4)$$

где  $v_{cp}$  — средняя скорость сообщения пассажира с учетом накладных затрат времени, км/ч.

Полученные в результате расчетов данные представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, при коротких поездках на расстояние 3–5 км средняя скорость сообщения пассажира достаточно низкая (в частности, на метро она составляет 10–13 км/ч). Очевидно, что для поездки на такие расстояния пассажиру удобнее использовать уличные виды транспорта (трамвай, троллейбус, автобус), поскольку скорости их сообщения несколько выше.

Необходимо отметить, что уличные виды транспорта, если заторы не затрудняют их движение, имеют среднюю скорость сообщения в пределах 15–20 км/ч. Поэтому развитие метрополитена и скоростного трамвая целесообразно только в тех городах, где большая доля пассажиров перемещается на расстояние 10 км и более, т.е. в городах с населением свыше 1 млн жителей, а также в менее крупных городах с линейной схемой освоения территории.

Отдельно следует сказать о системе скоростного автобуса. Как видно из рис. 2, при дальности поездки пассажира до 10 км скоростной автобус выигрывает по времени у метрополитена. Поэтому в городах с населением от 500 тыс. до 2 млн жителей скоростной автобус может стать наиболее эффективным видом пассажирского транспорта. Вместе с тем до сих пор скоростной автобус не рассматривается в качестве одного из вариантов решения транспортных проблем крупных и крупнейших российских городов.

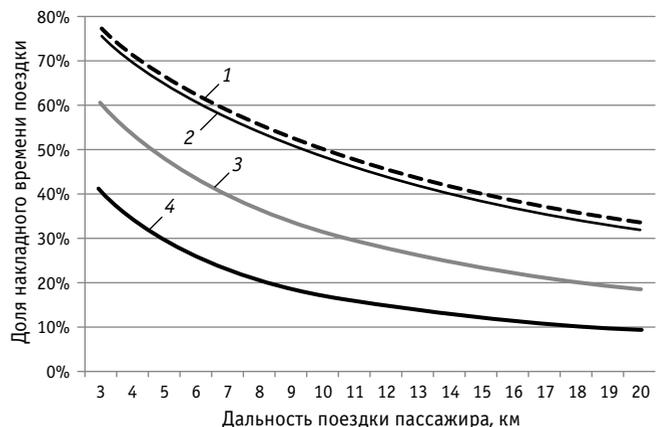


Рис. 1. Влияние дальности поездки пассажира скоростного вида транспорта на долю накладных затрат времени:

1 — вариант № 1; 2 — вариант № 2;  
3 — вариант № 3; 4 — вариант № 4

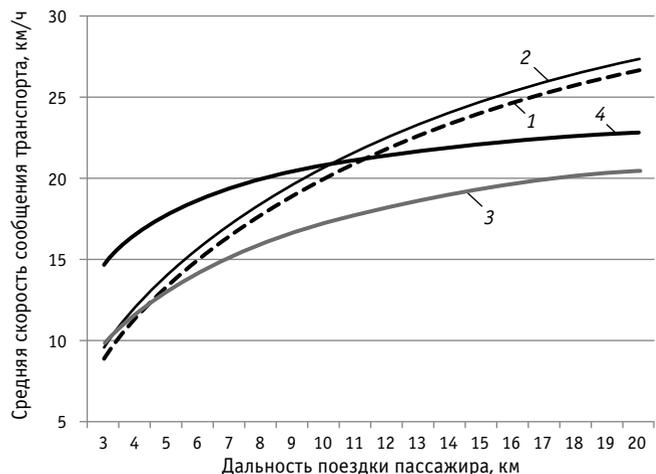


Рис. 2. Влияние дальности поездки на среднюю скорость сообщения:

1 — вариант № 1; 2 — вариант № 2;  
3 — вариант № 3; 4 — вариант № 4

## Выводы

В результате выполненных исследований и расчетов сформулированы следующие выводы.

1. При выборе скоростного общественного транспорта необходимо учитывать не только прогнозируемый поток пассажиров, но и схему маршрутов, которая будет обслуживать данную систему.

2. Целесообразность строительства того или иного вида скоростного общественного транспорта в первую очередь должна оцениваться средней дальностью поездки пассажиров. Для компактных городов с небольшой площадью освоенной территории средняя дальность поездки обычно составляет 3–5 км. Подобные показатели делают практически любой

вид скоростного общественного транспорта непривлекательным для потенциальных пассажиров.

3. Для снижения накладных затрат времени поездки пассажиров сеть скоростного транспорта необходимо проектировать с учетом минимизации времени пересадки, времени подхода, а также времени ожидания подвижного состава.

4. Выполненные расчеты показывают, что при развитии общественного транспорта в крупных и крупнейших городах Российской Федерации особое внимание следует уделить скоростному трамваю и скоростному автобусу, так как именно такие системы позволят в значительной мере улучшить обслуживание пассажиров при относительно небольших финансовых затратах.

## Литература

1. Голубев Г. Е. Современные принципы размещения и архитектурно-пространственной организации станций и пересадочных узлов метрополитена // Метрополитен и планировка крупнейшего города : тезисы докладов республиканской научно-технической конференции. Харьков : Изд-во ХИИКС, 1980. 153 с.
2. Александр К. Э., Руднева Н. А. Скоростной рельсовый транспорт в градостроительстве. Москва : Стройиздат, 1985. 140 с.
3. Графоаналитический метод в градостроительных исследованиях и проектировании / А. М. Якшин, Т. М. Говоренкова, М. И. Каган [и др.]. Москва : Стройиздат, 1979. 204 с.
4. Якушкин И. М. Пассажиры на метрополитенах. Москва : Транспорт, 1982. 175 с.
5. Цариков А. А. О накладном времени поездки и реальной скорости сообщения пассажира ГОПТ // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния : материалы XXV Международной (XXVIII Екатеринбургской) научно-практической конференции. Екатеринбург : Изд-во АМБ, 2019. С. 129–135.
6. Цариков А. А. Проблемы развития скоростного пассажирского транспорта в Екатеринбурге и пути их решения // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния : материалы XXVII Международной (XXX Екатеринбургской) научно-практической конференции. Екатеринбург : Изд-во Комвакс, 2021. С. 205–211.
7. Скоростные автобусные перевозки. Руководство по планированию. Нью-Йорк : Институт политики транспорта и развития, 2007. 1004 с.
8. Цариков А. А. Особенности проектирования систем скоростного пассажирского транспорта в городах различной формы освоения территории // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния : материалы XXVII Международной (XXX Екатеринбургской) научно-практической конференции. Екатеринбург : Изд-во Комвакс, 2021. С. 91–100.
9. Ваксман С. А., Цариков А. А. Стратегия развития скоростного транспорта в крупных и крупнейших городах России // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния. Минск : Изд-во БНТУ, 2018. С. 97–104.
10. Ефремов И. С., Кобозев В. М., Юдин В. А. Теория городских пассажирских перевозок. Москва : Высшая школа, 1980. 535 с.

## References

1. Golubev G. E. Modern principles of location and space planning of metro stations and transfer hubs [Sovremennyye printsipy razmesheniya i arkhitekturno-prostranstvennoy organizatsii stantsiy i peresadochnykh uzlov metropolitena] // Metro and planning of the biggest city : scientific conference abstracts of the Republic scientific and technical conference. Kharkov, 1980. 153 p.
2. Alexander K. E., Rudneva N. A. High-speed rail transport in urban planning [Skorostnoy rel'sovyy transport v gradostroitel'stve]. Moscow : Stroyizdat, 1985. 140 p.
3. Grapho-analytical method in urban planning studies and design [Grafoanaliticheskiy metod v gradostroitel'nykh issledovaniyakh i proektirovani] / A. M. Yakshin, T. M. Govorenkova, M. I. Kagan [et al.]. Moscow : Stroyizdat, 1979. 204 p.
4. Yakushkin I. M. Passenger traffic in metro [Passazhirskie perevozki na metropolitenakh]. Moscow : Transport, 1982. 175 p.
5. Tsarikov A. A. Regarding the overhead travel time and real speed of the passenger's traffic of urban public passenger transport [O nakladnom vremeni poezdki i real'noy skorosti soobshheniya passazhira GOPT] // Social and economic problems of development and operation of city transportation systems and areas of their influence : proceedings of the 25th International (the 28th Ekaterinburg) research and practice conference. Ekaterinburg : AMB, 2019. Pp. 129–135.
6. Tsarikov A. A. Challenges of high-speed passenger transport development in Yekaterinburg and methods to their solution [Problemy razvitiya skorostnogo passazhirskogo transporta v Ekaterinburge i puti ikh resheniya] // Social and economic problems of development and operation of city transportation systems and areas of their influence : proceedings of the 27th International (the 30th Ekaterinburg) research and practice conference. Ekaterinburg : Komvaks, 2021. Pp. 205–211.
7. Rapid bus transit. Guidelines on planning [Skorostnye avtobusnye perevozki. Rukovodstvo po planirovaniyu]. New York : Institute for Transportation and Development Policy, 2007. 1004 p.
8. Tsarikov A. A. Peculiar features of designing systems of high-speed passenger transport in cities of various forms of territory development [Osobennosti proektirovaniya sistem skorostnogo passazhirskogo transporta v gorodakh razlichnoy formy osvoeniya territorii] // Social and economic problems of development and operation of city transportation systems and areas of their influence : proceedings of the 27th International (the 30th Ekaterinburg) research and practice conference. Ekaterinburg : Komvaks, 2021. Pp. 91–100.
9. Vaksman S. A., Tsarikov A. A. Strategy for the development of high-speed transport in large and major cities of Russia [Strategiya razvitiya skorostnogo transporta v krupnykh i krupneyshikh gorodakh Rossii] // Social and economic problems of development and operation of city transportation systems and areas of their influence. Minsk : Publishing House of BNTU, 2018. Pp. 97–104.
10. Efremov I. S., Kobozev V. M., Yudin V. A. Urban passenger transportation theory [Teoriya gorodskikh passazhirskikh perevozk]. Moscow : Higher School, 1980. 535 p.

Объем статьи 0,64 авторских листа

УДК 656.13

Сергей Александрович Аземша, кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Управление автомобильными перевозками и дорожным движением»  
Белорусского государственного университета транспорта, Гомель, Республика Беларусь

## ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ВМЕСТИМОСТИ МОДУЛЯ В СОСТАВЕ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ РЕГУЛЯРНЫХ ГОРОДСКИХ ПЕРЕВОЗОК

Sergey Alexandrovich Azemsha, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Road Transport  
and Traffic Management Department, Belarusian State University of Transport (BSUT), Gomel, Republic of Belarus

### Substantiation of the optimal capacity of a module as part of a passenger vehicle for scheduled urban transportation

#### Аннотация

Несмотря на важную роль, которую играет городской общественный пассажирский транспорт (ГОПТ), технологии организации его работы устарели, что приводит к неэффективному использованию вместимости пассажирских транспортных средств (ПТС), росту себестоимости перевозок и, как следствие, к снижению окупаемости ГОПТ. Один из способов, с помощью которого можно повысить окупаемость городского общественного пассажирского транспорта, — применение модульных ПТС одинаковой вместимости. В периоды роста пассажиропотока количество модулей в них добавляется, а в периоды спада пассажиропотока — уменьшается, тем самым достигается снижение себестоимости перевозки. В статье дано обоснование оптимальной вместимости такого модульного ПТС, состав которого будет обеспечивать максимальную окупаемость работы городского общественного пассажирского транспорта.

**Ключевые слова:** эффективность перевозок, модуль, состав модульного пассажирского транспортного средства, использование вместимости, нейронная сеть.

#### Abstract

Despite the huge role played by urban public passenger transport (UPPT), the technologies for organizing its functioning are outdated, which leads to inefficient use of passenger vehicle capacity (PVC), an increase in the cost of transportation and, as a result, to a decrease in the recoupment of the functioning of UPPT. One of the methods by which it is possible to increase the recoupment of the UPPT functioning is the use of modular PVC of the identical capacity. During the passenger traffic growth periods, the quantity of modules is added to them, and during the periods of passenger traffic decline, it decreases, thereby reducing prime costs of transportation. The article provides a substantiation for the optimal capacity of such a modular PVC, the structure of which would ensure maximum recoupment of the functioning of urban public passenger transport.

**Keywords:** transportation efficiency, module, structure of a modular passenger vehicle, capacity usage, neural network.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-71-78

#### ВВЕДЕНИЕ

**П**овышение экономической эффективности работы городского общественного пассажирского транспорта (ГОПТ) — актуальная задача, которой посвящено немало научных исследований. Основной вывод этих исследований заключается в том, что причиной низкого коэффициента использования вместимости пассажирских транспортных средств (ПТС) является неравномерное распределение пассажиропотока по маршрутам и часам суток, а следовательно, перевозчики выполняют нерентабельные рейсы [1–3]. В частности, исследования, проведенные в Республике Беларусь [4–8], показали, что коэффициент пассажиронапряженности ПТС составляет порядка 30 % и существует значительная неравномерность в использовании вместимости ПТС по часам суток, маршрутам и направлениям движения.

Решить проблему можно, например, за счет сокращения числа рейсов. Однако это приведет к снижению качества транспортного обслуживания и потенциальному оттоку пассажиров. Альтернативный подход — подстройка вместимости ПТС под мощность пассажиропотока при сохранении количества выполняемых рейсов. Для реализации этого способа в ряде работ (например, [9, 10]) предлагается распределять автобусы различной вместимости по маршрутам в разное время суток с учетом мощности пассажиропотока. Вместе с тем, как показала практика, при использовании ПТС разных моделей (марок) с различной вместимостью требуются серьезные ремонтные мощности и склады запчастей. Кроме того, необходимость пересаживаться с одного ПТС на другой демотивирует водителей к бережной эксплуатации автобусов, что приводит к повышенному выходу из строя транспортных средств.

Еще один подход предложен в работе [11] — определение оптимальной вместимости ПТС с учетом минимизации общих затрат, связанных с эксплуатацией транспортной системы. Без сомнения, он может несколько повысить эффективность использования вместимости ПТС, но, с другой стороны, не позволит достаточно гибко подстраивать ее под меняющийся пассажиропоток.



**Рис. 1. Использование составов модульных ПТС с различным количеством модулей:**  
а — один модуль при спаде пассажиропотока; б — три модуля в период роста пассажиропотока

В статье [12] в качестве способа снижения бюджетной нагрузки на финансирование пассажирского транспорта регулярного сообщения рассматривается конкурсное распределение маршрутов с привлечением частных перевозчиков, рентабельность которых выше, чем у муниципальных операторов (схожие предложения опубликованы в [13, 14]). Стоит заметить, что это предложение позволит снизить затраты бюджета на перевозки, но не повлияет на эффективность функционирования маршрутов с точки зрения повышения окупаемости работы ГОПТ. Кроме того, не ясен механизм допуска частных к троллейбусным и трамвайным перевозкам.

Авторы статьи [15] на основании прогнозирования внутригодовых колебаний моделью сезонной волны (сезонных колебаний) предлагают такие мероприятия по обеспечению рентабельности работы ГОПТ, как повышение тарифа, снижение вместимости работающего на маршруте автобуса, увеличение интервала движения. Нет никакого сомнения, подобные меры только ухудшат качество обслуживания пассажиров и приведут к еще большему падению спроса на этот вид перевозок, что подтверждает работа [16], которая доказывает необходимость опережающего темпа роста заработной платы по сравнению с ростом стоимости проезда.

В [17] анализируется статистическая связь между окупаемостью работы автомобильных пассажирских перевозчиков, средним коэффициентом пассажиронапряженности на маршрутах и коэффициентом вариации коэффициента пассажиронапряженности. Установлено, что повышение коэффициента пассажиронапряженности и снижение коэффициента вариации коэффициента пассажиронапряженности ведут к росту окупаемости работы ГОПТ. Автор предлагает использовать составы модульных ПТС, которые позволяют уменьшать или увеличивать пассажироместность в зависимости от пассажиронапряженности для каждого выполняемого рейса (рис. 1). Тем самым себестоимость перевозки снижается, а окупаемость работы ГОПТ растет. Так, в период спада пассажиропотока, когда уменьшаются пассажиронапряженность и коэффициент пассажиронапряженности [18], рейс выполняется ПТС, состоящим из одного модуля (рис. 1а). При росте пассажиропотока пассажиронапряженность увеличивается [18], поэтому на конечных остановочных пунктах в состав ПТС добавляется необходимое количество модулей, обеспечивающих при выполнении рейса суммарную вместимость ПТС не меньше пассажиронапряженности (рис. 1б). Причем, что-

бы максимально снизить себестоимость такого рейса, разница между вместимостью состава модульного ПТС и пассажиронапряженностью должна быть минимальной. Для этого необходимо определить, какова оптимальная вместимость одного модуля, из нескольких единиц которого будет сформирован состав модульного ПТС для выполнения каждого рейса. Поэтому цель данной работы — обоснование оптимальной вместимости модуля ПТС, различные составы которого обеспечат максимум окупаемости работы ГОПТ.

#### ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ВМЕСТИМОСТИ МОДУЛЯ

В качестве исходных данных взяты параметры работы автобусов на городских маршрутах Гомеля и Могилева. Общее число маршрутов — 81, общее количество рассмотренных по этим маршрутам рейсов — 1747. В качестве целевой переменной принята самоокупаемость работы на маршрутах (0, %). В качестве независимых параметров для каждого маршрута приняты:

- 1) максимальный пассажиропоток за рейс (пассажиронапряженность  $N_{\max}$ ) — максимальное количество пассажиров, находящихся в салоне ПТС за рейс, пасс.;
- 2) число перевезенных за рейс пассажиров ( $Q$ ), пасс.;
- 3) город ( $C$ ) — категориальная переменная, принимающая два значения: Гомель и Могилев;
- 4) вместимость ПТС ( $P_a$ ), пасс.;
- 5) коэффициент пассажиронапряженности за рейс ( $K_{\Pi}$ ) — отношение максимального пассажиропотока за рейс (пассажиронапряженности) к вместимости ПТС ( $K_{\Pi} = N_{\max}/P_a$ );
- 6) средний коэффициент пассажиронапряженности на маршруте ( $K_{\text{ср}}$ ) — математическое ожидание значений  $K_{\Pi}$  на данном маршруте;
- 7) дисперсия коэффициента пассажиронапряженности на маршруте ( $DK_{\Pi}$ ) — дисперсия значений  $K_{\Pi}$  на данном маршруте;
- 8) коэффициент вариации коэффициента пассажиронапряженности на маршруте ( $KK_{\Pi}$ ) — коэффициент вариации значений  $K_{\Pi}$  на данном маршруте;
- 9) номер маршрута ( $N_m$ );
- 10) длина маршрута ( $L$ ), км;
- 11) год ( $Year$ ) — категориальная переменная, показывающая год проведения обследований пассажиропотока;
- 12) стоимость проезда ( $S$ ), руб.;
- 13) период суток ( $T$ ) — категориальная переменная, показывающая, в каком часу суток начал выполняться рейс.

Выдвигалась гипотеза о наличии статистической связи между окупаемостью работы на маршруте ( $O$ ) и управляемыми параметрами. Диаграмма вклада каждой независимой переменной в значение зависимой переменной ( $O$ ) представлена на рис. 2.

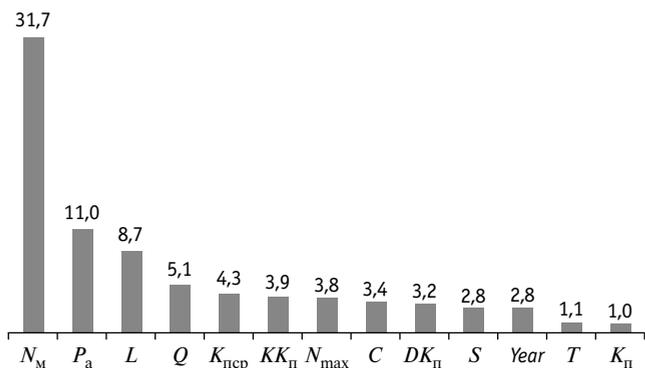


Рис. 2. Значимость вклада независимых переменных в значение зависимой переменной

Как видно из рис. 2, наибольший вклад в окупаемость работы ГОПТ вносит номер маршрута, т.е. пространственное положение трассы следования ПТС. Исходя из этого первостепенным направлением работ по повышению окупаемости ГОПТ следует выбрать оптимизацию маршрутной сети. В то же время необходимо понимать, что такая оптимизация приводит к изменению существующей маршрутной сети и, как правило, ущемляет интересы пассажиров на направлениях с малой мощностью пассажиропотока. В конечном счете это приводит к снижению качества обслуживания пассажиров и возможному отказу некоторой их части от пользования услугами ГОПТ. Кроме того, маршрут работы, по сути, определяет количество перевезенных пассажиров ( $Q$ ), пассажиронапряженность ( $N_{max}$ ) и все остальные показатели, представленные на рис. 2, которые зависят от значения пассажиронапряженности (т.е.  $K_{пер}$ ,  $KK_{п}$ ,  $DK_{п}$ ). Таким образом, все эти параметры находятся в некоторой взаимосвязи друг с другом.

Вторым по значимости фактором является вместимость ПТС ( $P_a$ ). Представляется, что подстройка этого параметра под существующую мощность пассажиропотока позволит улучшить показатели использования вместимости ПТС и повысить окупаемость работы ГОПТ. Определяющим фактором такой подстройки будет пассажиронапряженность ( $N_{max}$ ), так как вместимость ПТС, выполняющего рейс, должна обеспечивать перевозку максимально имеющегося за этот рейс числа пассажиров. Отметим, что такая оптимизация, в отличие от оптимизации маршрутной сети, не требует изменений действующего расписания движения и увеличения стоимости проезда, а следовательно, не приведет к ухудшению качества предоставляемых пассажирам услуг.

Важно, что при изменении вместимости ПТС ( $P_a$ ) будут изменяться и некоторые другие независимые факторы ( $K_{пер}$ ,  $KK_{п}$ ,  $DK_{п}$ ), которые, как видно из рис. 2, тоже существенно влияют на величину окупаемости. Поэтому для поиска регрессионных зависимостей между зависимой переменной  $O$  и не-

зависимыми переменными классические методы не подходят по причине наличия эффекта мультиколлинеарности и присутствия в исходных данных категориальных переменных.

В ряде работ показано, что эффект мультиколлинеарности не появляется в нейронных сетях [19, 20], поэтому для описания связи между независимыми и зависимой переменными нами использовались нейросетевые методы, реализованные в программном пакете Statistica 13.3 [21]. Кроме того, по сравнению с классическими методами нейронные сети имеют ряд преимуществ [22, 23]. Рассмотрим их.

1. Нелинейные взаимосвязи. Нейронные сети способны моделировать сложные нелинейные отношения между входными и выходными переменными. Это особенно важно в тех случаях, когда связь между переменными смоделировать методами линейной регрессии достаточно сложно.

2. Высокоразмерные данные. Нейронные сети обрабатывают данные высокой размерности, так как способны автоматически изучать соответствующие характеристики на основе входных параметров, что может быть затруднительно при использовании классических методов регрессии.

3. Устойчивость к шуму. Нейронные сети более устойчивы к зашумленным данным, чем классические методы регрессии. Это происходит потому, что они могут научиться обобщать зашумленные данные, распознавая в них закономерности.

4. Гибкость. Нейронные сети можно настроить на различные типы данных и на решение разных видов задач. Это делает их универсальными и применимыми к широкому кругу проблем регрессии.

5. Автоматическое извлечение признаков. Нейронные сети способны автоматически извлекать признаки из входных данных, сокращая необходимость в ручном поиске признаков. Это позволяет экономить время и снижает трудоемкость процесса моделирования.

При построении нейронной сети использовалась процедура регуляризации [24, 25]. Это метод, позволяющий предотвратить переобучение нейронных сетей, которая происходит, когда модель слишком сложна и слишком хорошо подходит к обучающим данным, но плохо обобщается на новые данные. Суть процедуры регуляризации заключается в добавлении штрафного члена к функции стоимости нейронной сети, который побуждает сеть к обучению более простых и обобщающих представлений. Цель регуляризации — улучшить обобщающие характеристики нейронной сети, т.е. способность модели делать точные предсказания на новых, невидимых, данных. Без регуляризации нейронная сеть способна научиться соответствовать шуму в обучающих данных, что может привести к низкой эффективности на новых данных.

В процессе наших исследований, выполненных при помощи программного пакета Statistica 13.3 [21], установлено, что для описания связи между независимыми и зависимой переменными подходит многослойный перцептрон архитектуры 127-6-1 с тождественными функциями активации скрытых и выходных нейронов и алгоритмом обучения BFGS 81. Производительность обучающей выборки составила 0,9966, контрольной и тестовой — 0,9951 и 0,9958 соответственно. Распределение остатков показано на рис. 3.

Как видно из рис. 3, визуально распределение остатков схоже с нормальным законом распределения, что наряду с высоким коэффициентом корреляции подтверждает возможность применения полученной нейронной сети для целей прогнозирования.

В статье [17] для повышения окупаемости работы пассажирских транспортных средств предложено использовать составы модульных ПТС, т.е. ПТС, состоящих из отдельных прицепных единиц — модулей (см. рис. 1). В период спада пассажиропотока рейс выполняется ПТС, состоящим из одного модуля (см. рис. 1а). В период роста пассажиропотока количество модулей в составе ПТС увеличивается так, чтобы его суммарная вместимость была не ниже пассажиронапряженности для данного рейса (см. рис. 1б). Причем с точки зрения минимизации себестоимости выполнения ездки состав модульного ПТС должен обеспечить минимальную разность между своей вместимостью и пассажиронапряженностью. В этих условиях актуальным становится вопрос по выявлению оптимальной вместимости одного модуля, из определенного числа которых будет сформирован состав модульного ПТС для выполнения каждого рейса.

Чтобы получить ответ на этот вопрос, на основе нейронной сети проведено моделирование работы составов модульных ПТС при различных значениях вместимости одного модуля. Моделирование выполнялось по следующему алгоритму.

1. Принималось значение вместимости одного модуля, равное 10 пассажирам ( $P_M = 10$ ).

2. Для каждого из рассмотренных 1747 рейсов определялась оптимальная вместимость состава модульного ПТС:

$$P_{ai} - N_{\max i} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $i$  — номер рейса, для которого определяется вместимость состава модульного ПТС.

При этом должны выполняться следующие условия:

$$P_{ai} = P_M K_i, \quad i = 1 \dots 1747; \quad (2)$$

$$P_{ai} = N_{\max i} \geq 0, \quad (3)$$

где 1747 — количество моделируемых рейсов;

$K_i$  — количество модулей при моделировании  $i$ -го рейса, устанавливается последовательным перебором целых чисел 1, 2, 3 ... до тех пор, пока не будет выполнено ограничение (3), учитывающее возможность размещения в салоне модульного ПТС максимального числа пассажиров, равного пассажиронапряженности ( $N_{\max i}$ ).

3. С учетом полученных значений  $P_{ai}$  определялись значения зависящих от него переменных:  $K_{гр}$ ,  $K_{пер}$ ,  $DK_{гр}$ ,  $KK_{гр}$ . Остальные значения входных переменных ( $N_{\max}$ ,  $Q$ ,  $C$ ,  $N_M$ ,  $L$ ,  $Year$ ,  $S$ ,  $T$ ) оставались без изменений, поскольку они не зависят от вместимости работающего на маршруте состава модульного ПТС.

4. Полученные таким образом значения независимых переменных подставлялись в обученную и описанную выше нейронную сеть, которая выдавала смоделированные значения окупаемости ( $O$ ) за каждый рейс.

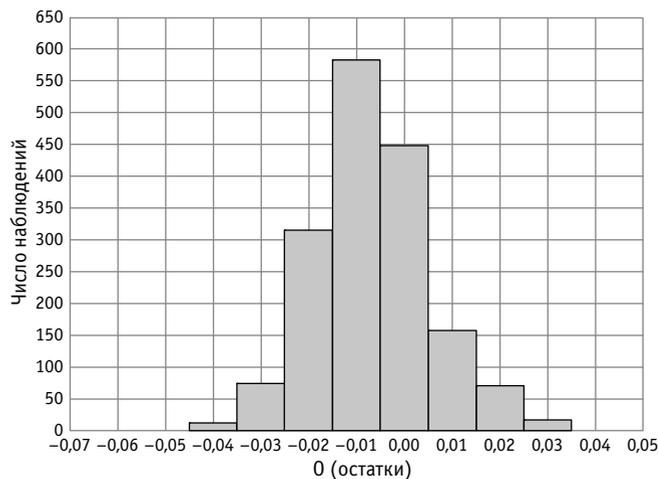


Рис. 3. Распределение остатков между фактическим и полученным при помощи нейронной сети значением окупаемости работы ГОПТ

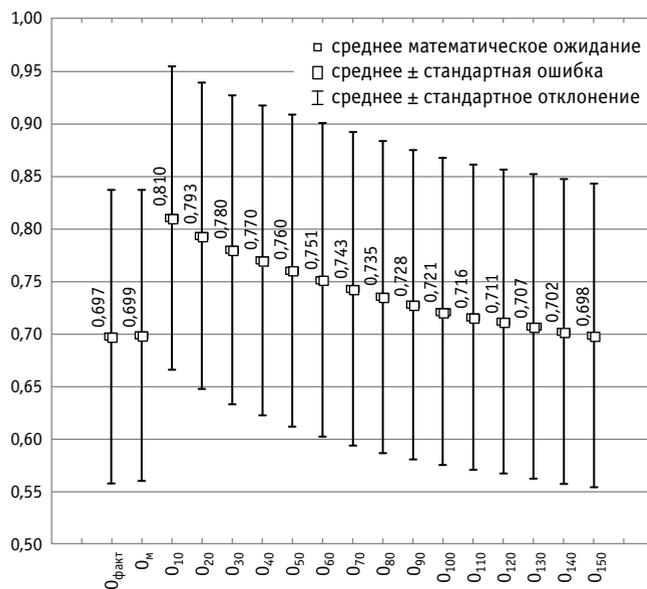


Рис. 4. Диаграммы размаха окупаемости работы ГОПТ в зависимости от вместимости одного модуля

5. Значение вместимости одного модуля ( $P_M$ ) увеличивалось на 10. Далее осуществлялся переход к шагу 2.

Моделирование по рассмотренному алгоритму производилось до вместимости одного модуля 150 пассажиров ( $P_M = 150$ ) с шагом 10 пассажиров. Результаты моделирования иллюстрирует рис. 4, на котором показаны диаграммы размаха окупаемости работы ГОПТ:

фактической ( $O_{факт}$ );

смоделированной с использованием нейронной сети при фактических значениях вместимости ПТС ( $O_M$ );

смоделированной с использованием нейронной сети при различных значениях вместимости одного модуля в составе модульного ПТС ( $O_{10} - O_{150}$ ).

Из рис. 4 видно, что с уменьшением вместимости одного модуля, из которых состоит состав модульных ПТС, среднее значение окупаемости работы ГОПТ увеличивается. Максимум среднего значения составляет 81 % при вместимости одного модуля 10 пассажиров.

Чтобы оценить значимость различий окупаемости при разной вместимости модуля, использовались ранговый дисперсионный анализ Фридмана и конкордация Кендалла. Выбор инструментария обусловлен тем, что рассматриваемые выборки являются зависимыми, а закон распределения окупаемости отличен от нормального [26]. Расчет указанных критериев в программном пакете Statistica 13.3 [21] показал значимость таких различий.

Рост окупаемости с уменьшением вместимости модуля объясняется тем, что модуль меньшей вместимости дает возможность более точно подстраивать суммарную вместимость состава модульного ПТС под пассажиронапряженность, наблюдаемую

при выполнении каждой ездки. Это, в свою очередь, позволяет снизить вместимость состава модульного ПТС, которым выполняется ездка, сократить себестоимость перевозки и повысить окупаемость работы ГОПТ. То есть уменьшение вместимости одного модуля ведет к увеличению коэффициента пассажиронапряженности (рис. 5), снижению коэффициента вариации коэффициента пассажиронапряженности (рис. 6) и, как следствие, к росту окупаемости пассажирских перевозок (рис. 7 и 8), что согласуется с результатами, полученными в [17].

Следует иметь в виду, что полученное оптимальное значение модуля в составе модульного ПТС рассчитано без учета возможных конструктивных ограничений на модуль, конструкцию сцепки состава модульного ПТС, а также ограничений, связанных с максимально допустимой длиной состава модульного ПТС. Учету этих факторов планируется посвятить дальнейшие исследования.

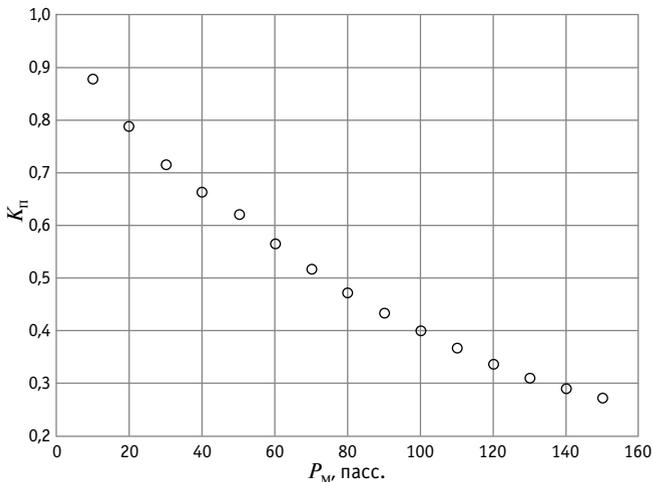


Рис. 5. Влияние вместимости модуля на среднее значение коэффициента пассажиронапряженности

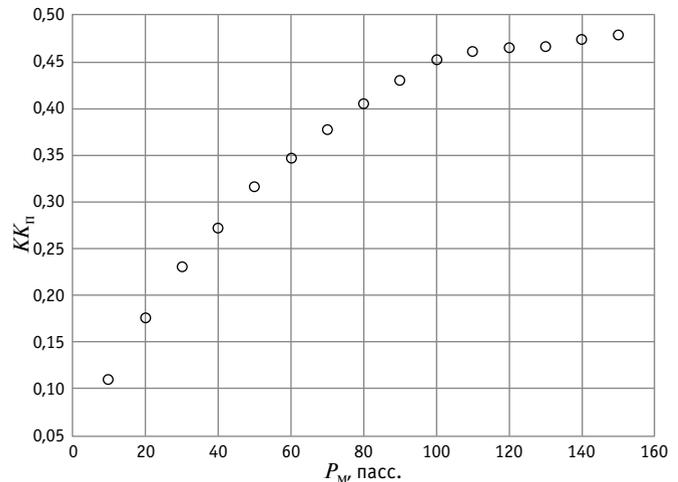


Рис. 6. Влияние вместимости модуля на коэффициент вариации среднего значения коэффициента пассажиронапряженности

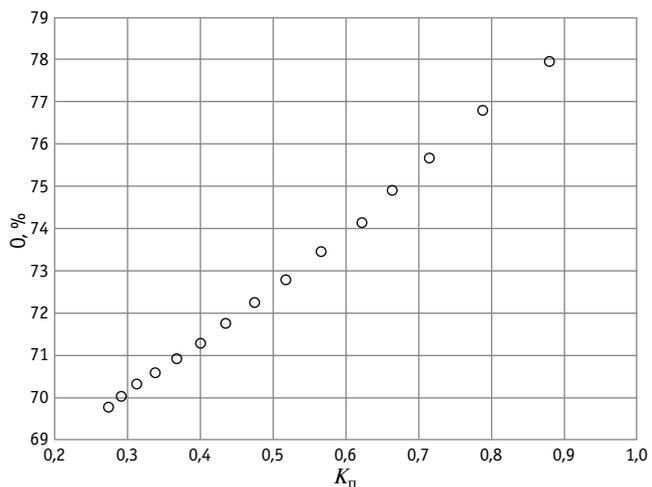


Рис. 7. Влияние коэффициента пассажиронапряженности на окупаемость работы ГОПТ

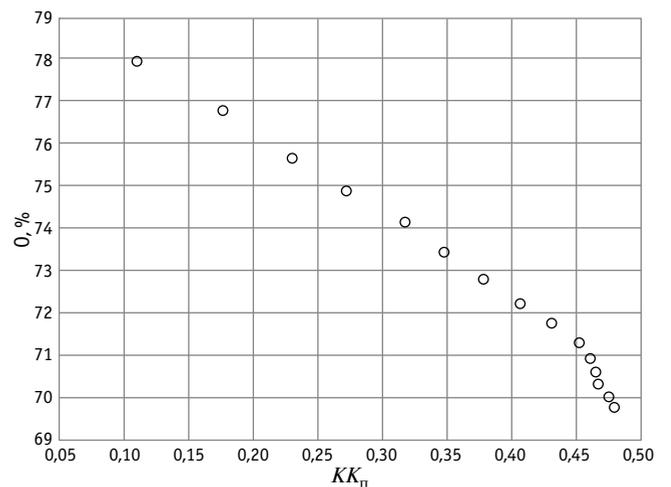


Рис. 8. Влияние коэффициента вариации коэффициента пассажиронапряженности на окупаемость работы ГОПТ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная новизна представленного в статье исследования состоит в следующем.

1. Применение нейросетевых технологий для установления факторов, влияющих на окупаемость работы ГОПТ. Проанализировано 1747 ездов, выполненных на 81 городском маршруте Гомеля и Могилева. В качестве целевой (зависимой) переменной принята окупаемость работы на этих маршрутах (0, %). В качестве независимых переменных — максимальный пассажиропоток за рейс (пассажиронапряженность), количество перевезенных пассажиров, город, вместимость автобуса, коэффициент пассажиронапряженности за рейс, средний коэффициент пассажиронапряженности на маршруте, дисперсия коэффициента пассажиронапряженности на маршруте, коэффициент вариации коэффициента пассажиронапряженности на маршруте, номер маршрута, длина маршрута, год, стоимость проезда, период суток. Установлено, что для описания связи между независимыми и зависимой переменными подходит многослойный перцептрон архитектуры 127-6-1 с тождественными функциями активации скрытых и выходных нейронов и алгоритмом обучения BFGS 81. Производительность обучающей выборки составила 0,9966, контрольной и тестовой — 0,9951 и 0,9958 соответственно. Распределение остатков схоже с нормальным законом распределения (см. рис. 3), что показывает возмож-

ность использования полученной нейронной сети для целей прогнозирования.

2. Моделирование при помощи нейронной сети значений окупаемости работы ГОПТ в зависимости от вместимости одного модуля в составе модульного ПТС. Для этого в нейронную сеть подставлялись значения вместимости состава модульных ПТС, полученные при вместимости одного модуля от 10 до 150 с шагом 10. Для каждого такого значения производилось моделирование окупаемости. Установлено, что модуль меньшей вместимости дает возможность более точной подстройки вместимости всего состава модульного ПТС под имеющуюся пассажиронапряженность, наблюдаемую при выполнении каждой ездки. Это ведет к снижению себестоимости перевозки и, как следствие, к повышению окупаемости работы ГОПТ.

3. Оценка эффекта от внедрения модульных ПТС, состоящих из модулей оптимальной пассажиروместимости. Установлено, что использование модульных ПТС, состоящих из модулей вместимостью 10 пассажиров, позволяет повысить окупаемость работы ГОПТ с 69,7 до 81 %.

Дальнейшие исследования в данном направлении целесообразно сосредоточить на обосновании вместимости модуля с учетом возможных вариантов его конструкции и конструкций сцепных устройств в составе модульного ПТС, ограничений, накладываемых на длину состава модульного ПТС, а также на разработке методики управления парком модулей.

## Литература

1. Traveling heterogeneity in public transportation / C. Ponte, H. P. M. Melo, C. Caminho [et al.]. URL: <https://epjdatascience.springeropen.com/articles/10.1140/epjds/s13688-018-0172-6> (дата обращения: 15.08.2019).
2. Adra N., Michaux J. L., Andre M. Analysis of the load factor and the empty running rate for road transport. Artemis — assessment and reliability of transport emission models and inventory systems. 2004, 31 p. hal-00546125.
3. Average Vehicle Occupancy Factors for Computing Travel Time Reliability Measures and Total Peak Hour Excessive Delay Metrics (April 2018). URL: [https://www.fhwa.dot.gov/tpm/guidance/avo\\_factors.pdf](https://www.fhwa.dot.gov/tpm/guidance/avo_factors.pdf) (дата обращения: 15.08.2019).
4. Azemsha S. The Study of the Trolley Buses Occupancy // Global Journal of Management and Business Research: F Real Estate, Event and Tourism Management. 2019. Vol. 19. Issue 1. Pp. 6–15. [https://globaljournals.org/GJMbr\\_Volume19/2-The-Study-of-the-Trolley-Buses.pdf](https://globaljournals.org/GJMbr_Volume19/2-The-Study-of-the-Trolley-Buses.pdf).
5. Аземша С. А. Оценка неравномерности использования вместимости общественного пассажирского транспорта // Логистический аудит транспорта и цепей поставок : материалы II Международной научно-практической конференции, Тюмень, 26 апреля 2019 г. Тюмень : ТИУ, 2019. С. 16–23.
6. Аземша С. А., Грищенко Т. В., Ясинская О. О. Исследование наполняемости автобусов при городских перевозках пассажиров в г. Светлогорске // Вестник Брестского государственного технического университета. Сер. : Физика, математика, информатика. 2019. № 5 (118). С. 37–40.
7. Аземша С. А., Грищенко Т. В., Ясинская О. О. Исследование наполняемости автобусов при городских перевозках пассажиров

## References

1. Traveling heterogeneity in public transportation / C. Ponte, H. P. M. Melo, C. Caminho [et al.]. URL: <https://epjdatascience.springeropen.com/articles/10.1140/epjds/s13688-018-0172-6> (access date: 15.08.2019).
2. Adra N., Michaux J. L., Andre M. Analysis of the load factor and the empty running rate for road transport. Artemis — assessment and reliability of transport emission models and inventory systems. 2004, 31 p. hal-00546125.
3. Average Vehicle Occupancy Factors for Computing Travel Time Reliability Measures and Total Peak Hour Excessive Delay Metrics (April 2018). URL: [https://www.fhwa.dot.gov/tpm/guidance/avo\\_factors.pdf](https://www.fhwa.dot.gov/tpm/guidance/avo_factors.pdf) (access date: 15.08.2019).
4. Azemsha S. The Study of the Trolley Buses Occupancy // Global Journal of Management and Business Research: F Real Estate, Event and Tourism Management. 2019. Vol. 19. Issue 1. Pp. 6–15. [https://globaljournals.org/GJMbr\\_Volume19/2-The-Study-of-the-Trolley-Buses.pdf](https://globaljournals.org/GJMbr_Volume19/2-The-Study-of-the-Trolley-Buses.pdf).
5. Azemsha S. A. Assessment of the uneven use of public passenger transport capacity [Otsenka neravnomernosti ispol'zovaniya vmestimosti obshhestvennogo passazhirskogo transporta] // Logistic audit of transport and supply chains : proceedings of the 2nd International scientific and practical conference, Tyumen, April 26, 2019. Tyumen : TIU, 2019. Pp. 16–23.
6. Azemsha S. A., Grishhenko T. V., Yasinskaya O. O. Study of bus filling in urban passenger transport in the City of Svetlogorsk [Issledovanie napolnyaemosti avtobusov pri gorodskikh perevozkakh passazhirov v g. Svetlogorske] // Vestnik of Brest State Technical University. Physics. Mathematics. Informatics. 2019. No. 5 (118). Pp. 37–40.
7. Azemsha S. A., Grishhenko T. V., Yasinskaya O. O. Research buses occupancy rate in Mogilev [Issledovanie napolnyaemosti avtobusov pri gorodskikh perevozkakh passazhirov v g. Mogileve] // Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied sciences. 2020. No. 11. Pp. 62–69. ISSN 2070-1616.

- в г. Гомелеве // Вестник Полоцкого государственного технического университета. Сер. В : Промышленность. Прикладные науки. 2020. № 11. С. 62–69. ISSN 2070-1616.
8. Azemsha S., Kapski D. The Study of Public Transport Occupancy Rate Patterns in Belarusian cities // International Journal of Engineering Inventions. 2022. Vol. 11. Issue 12. Pp. 128–134. ISSN 2319-6491.
  9. Скиркоцкий С. В. Исследование влияния факторов на результативность работы городского пассажирского маршрутизированного транспорта // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2017. № 1 (34). С. 30–35.
  10. Рябов И. М., Кашманов Р. Я. Совершенствование организации обслуживания пассажиров на маршруте путем использования автобусов разной вместимости // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16. № 3 (67). С. 264–275. DOI: 10.26518/2071-7296-2019-3-264-275. ISSN 2071-7296.
  11. Повышение эффективности функционирования транспортной сети городского пассажирского транспорта путем применения автоматизации модели выбора оптимального подвижного состава / В. Е. Гозбенко, М. Н. Крипак, О. А. Лебедева, С. К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 2 (54). С. 203–208. ISSN 1813-9108.
  12. Шлиппе И. И., Оганесян Т. С. Анализ условий формирования и развития рынка пассажирских перевозок городским автобусным транспортом // Вестник МГУ. Сер. 6. Экономика. 2017. № 1. С. 86–99. ISSN 0130-0105.
  13. Ковалев Р. Н., Степанов А. С., Черницын С. А. Исследование эффективности муниципальных автобусных маршрутов (на примере г. Екатеринбурга) // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. ISSN 2070-7428.
  14. Гавриков В. А., Пеньшин Н. В., Анохин С. А. Социально-экономические проблемы организации работы городского общественного транспорта // Глобальный научный потенциал. 2019. № 3 (96). С. 125–129. ISSN 1997-9355.
  15. Белокуров В. П., Мотузка Д. А., Артемов А. Ю. Повышение эффективности эксплуатации автотранспорта при осуществлении сезонных пассажирских перевозок в городах курортных зон // Технология колесных и гусеничных машин. 2015. № 3 (19). С. 25–33. ISSN 2227-9393.
  16. Григорова Т. М., Давидіч Ю. О., Доля В. К. Оцінка еластичності попиту на послуги приміського пасажирського автомобільного транспорту // Технологічний аудит і резерви виробництва. 2015. № 3/2 (23). С. 13–16. ISSN 2226-3780.
  17. Аземша С. А. Разработка предложений по повышению эффективности работы общественного городского пассажирского транспорта // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16. № 5 (69). С. 544–557. DOI: 10.26518/2071-7296-2019-5-544-557. ISSN 2071-7296.
  18. Аземша С. А. Определение статистической связи между параметрами пассажиропотока и маршрута при городских перевозках пассажиров в регулярном сообщении // Логистический аудит транспорта и цепей поставок : материалы II международной научно-практической конференции, Тюмень, 26 апреля 2019 г. Тюмень : ТИУ, 2019. С. 8–15.
  19. De Veaux R. D., Ungar L. H. Multicollinearity: A tale of two nonparametric regressions. In : Cheeseman P., Oldford R. W. (eds) Selecting Models from Data. Lecture Notes in Statistics. 1994. Vol. 89. DOI: 10.1007/978-1-4612-2660-4\_40.
  8. Azemsha S., Kapski D. The Study of Public Transport Occupancy Rate Patterns in Belarusian cities // International Journal of Engineering Inventions. 2022. Vol. 11. Issue 12. Pp. 128–134. ISSN 2319-6491.
  9. Skirkovskiy S. V. Research of influence factors on the performance of the urban passenger transport routed [Issledovanie vliyaniya faktorov na rezultativnost' raboty gorodskogo passazhirskogo marshrutizirovannogo transporta] // Bulletin of BSUT: science and transport. 2017. No. 1 (34). Pp. 30–35.
  10. Ryabov I. M., Kashmanov R. Ya. Improving the organization of passenger service on the route by using buses of different capacity [Sovershenstvovanie organizatsii obluzhivaniya passazhirov na marshrute putem ispol'zovaniya avtobusov raznoy вместимости] // The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2019. Vol. 16. No. 3 (67). Pp. 264–275. DOI: 10.26518/2071-7296-2019-3-264-275. ISSN 2071-7296.
  11. Improvement in the functioning of transport network of urban passenger transport by using automation of optimal rolling stock selection model [Povyshenie effektivnosti funktsionirovaniya transportnoy seti gorodskogo passazhirskogo transporta putem primeneniya avtomatizatsii modeli vybora optimal'nogo podvizhnogo sostava] / V. E. Gozbenko, M. N. Kripak, O. A. Lebedeva, S. K. Kargapoltsev // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2017. No. 2 (54). Pp. 203–208. ISSN 1813-9108.
  12. Shlippe I. I., Oganesyanyan T. S. The formation and development of the public bus transport market [Analiz usloviy formirovaniya i razvitiya rynka passazhirskikh perevozk gorodskim avtobusnym transportom] // Vestnik of MSU. Series 6. Economics. 2017. No. 1. Pp. 86–99. ISSN 0130-0105.
  13. Kovalev R. N., Stepanov A. S., Chernitsyn S. A. Research of municipal bus service efficiency (in terms of Yekaterinburg city) [Issledovanie effektivnosti munitsipal'nykh avtobusnykh marshrutov (na primere g. Ekaterinburga)] // Modern Problems of Science and Education. 2014. No. 4. ISSN 2070-7428.
  14. Gavrikov V. A., Peshin N. V., Anokhin S. A. Socio-economic problems of the organization of work of the city public transport [Sotsial'no-ekonomicheskie problemy organizatsii raboty gorodskogo obshchestvennogo transporta] // Global Scientific Potential. 2019. No. 3 (96). Pp. 125–129. ISSN 1997-9355.
  15. Belokurov V. P., Motuzka D. A., Artemov A. Yu. Improving the passenger vehicles efficiency of operation in seasonal traffic in the cities of resort areas [Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii avtotransporta pri osushhestvlenii sezonnykh passazhirskikh perevozk v gorodakh kurortnykh zon] // Technology of Wheeled and Tracked Machines. 2015. No. 3 (19). Pp. 25–33. ISSN 2227-9393.
  16. Grigорова Т. М., Davidich Yu. O., Dolya V. K. Assessment of elasticity of demand for services of suburban road passenger transport [Otsenka elastichnosti sprosa na usluzhi prigorodnogo passazhirskogo avtomobil'nogo transporta] // Technology audit and production reserves. 2015. No. 3/2 (23). Pp. 13–16. ISSN 2226-3780.
  17. Azemsha S. A. Development of proposals to improve the efficiency of public urban passenger transport [Razrabotka predlozheniy po povysheniyu effektivnosti raboty obshchestvennogo gorodskogo passazhirskogo transporta] // The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2019. Vol. 16. No. 5 (69). Pp. 544–557. DOI: 10.26518/2071-7296-2019-5-544-557. ISSN 2071-7296.
  18. Azemsha S. A. Determination of the statistical relationship between the parameters of passenger traffic and the route during urban passenger transportation in scheduled traffic services [Opredelenie statisticheskoy svyazi mezhdru parametrami passazhiropotoka i marshruta pri gorodskikh perevozkakh passazhirov v regul'yarnom soobshhenii] // Logistic audit of transport and supply chains : proceedings of the 2nd International scientific and practical conference, Tyumen, April 26, 2019. Tyumen : TIU, 2019. Pp. 8–15.
  19. De Veaux R. D., Ungar L. H. Multicollinearity: A tale of two nonparametric regressions. In : Cheeseman P., Oldford R. W. (eds) Selecting Models

20. Multicollinearity Effect in Regression Analysis: A Feed Forward Artificial Neural Network Approach / Ch. Obite, N. Olewuezi, G. Ugwuanyim, D. Bartholomew // Asian Journal of Probability and Statistics. 2020. Pp. 22–33. DOI: 10.9734/ajpas/2020/v6i130151.
21. Statistica 13.3. Computer program. Serial number JRR709H998119TE-A.
22. Artificial Neural Networks for nonlinear regression and classification / A. Landi, P. Piaggi, M. Laurino, D. Menicucci // The 10th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, ISDA 2010, November 29 — December 1, 2010, Cairo, Egypt. 115-120. DOI: 10.1109/ISDA.2010.5687280.
23. Comparison of Ensemble and Deep Learning Algorithms to Model Groundwater Levels in a Data-Scarce Aquifer of Southern Africa / Z. Gaffoor, K. Pietersen, N. Jovanovic [et al.] // Hydrology. 2022. 9. 125. DOI: 10.3390/hydrology9070125.
24. Michelucci U. Regularization: A Case-Based Approach to Understanding Deep Neural Networks // Applied Deep Learning. 2018. Pp. 185–216. DOI: 10.1007/978-1-4842-3790-8\_5.
25. Ismoilov N. Jang S.-B. A Comparison of Regularization Techniques in Deep Neural Networks // Symmetry. 2018. 10. 648. DOI: 10.3390/sym10110648.
26. Аземша С. А., Капский Д. В. Статистическое исследование окупаемости работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения // Вестник Полоцкого государственного технического университета. Сер. В : Промышленность. Прикладные науки. 2020. № 11. С. 70–77. ISSN 2070-1616.
- from Data. Lecture Notes in Statistics. 1994. Vol. 89. DOI: 10.1007/978-1-4612-2660-4\_40.
20. Multicollinearity Effect in Regression Analysis: A Feed Forward Artificial Neural Network Approach / Ch. Obite, N. Olewuezi, G. Ugwuanyim, D. Bartholomew // Asian Journal of Probability and Statistics. 2020. Pp. 22–33. DOI: 10.9734/ajpas/2020/v6i130151.
21. Statistica 13.3. Computer program. Serial number JRR709H998119TE-A.
22. Artificial Neural Networks for nonlinear regression and classification / A. Landi, P. Piaggi, M. Laurino, D. Menicucci // The 10th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, ISDA 2010, November 29 — December 1, 2010, Cairo, Egypt. 115-120. DOI: 10.1109/ISDA.2010.5687280.
23. Comparison of Ensemble and Deep Learning Algorithms to Model Groundwater Levels in a Data-Scarce Aquifer of Southern Africa / Z. Gaffoor, K. Pietersen, N. Jovanovic [et al.] // Hydrology. 2022. 9. 125. DOI: 10.3390/hydrology9070125.
24. Michelucci U. Regularization: A Case-Based Approach to Understanding Deep Neural Networks // Applied Deep Learning. 2018. Pp. 185–216. DOI: 10.1007/978-1-4842-3790-8\_5.
25. Ismoilov N. Jang S.-B. A Comparison of Regularization Techniques in Deep Neural Networks // Symmetry. 2018. 10. 648. DOI: 10.3390/sym10110648.
26. Azemsha S. A., Kapskiy D. V. Statistical study of return of work city passenger transport regular messages [Statisticheskoe issledovanie okupaemosti raboty gorodskogo passazhirskogo transporta regul'yarnogo soobshheniya] // Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied sciences. 2020. No. 11. Pp. 70–77. ISSN 2070-1616.

Объем статьи 1 авторский лист

УДК 656.08

Егор Викторович Голов, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры транспортных систем Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ), Санкт-Петербург, Россия,

Елена Валерьевна Сорокина, аспирант, старший преподаватель кафедры транспортных систем Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ), Санкт-Петербург, Россия,

Станислав Сергеевич Евтюков, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой транспортных систем Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ), Санкт-Петербург, Россия

## СПЕЦИФИКА КОЛЕЕОБРАЗОВАНИЯ КАК ФАКТОРА РИСКА ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ В ПОДСИСТЕМЕ «АВТОМОБИЛЬНАЯ ДОРОГА»

Egor Viktorovich Golov, PhD in Engineering, Senior Lecturer, Transport Systems Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), St. Petersburg, Russia,

Elena Valeryevna Sorokina, postgraduate student, Senior Lecturer, Transport Systems Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), St. Petersburg, Russia

Stanislav Sergeevich Evtjukov, DSc in Engineering, Associate Professor, Head of Transport Systems Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), St. Petersburg, Russia

### The specifics of wheeltrack formation as a risk factor for road traffic accidents in the «Motor road» subsystem

#### Аннотация

В статье рассмотрены причины возникновения колеи, связанные с динамическим воздействием колес транспортных средств на дорожное полотно. В ходе проведенного исследования изучен характер изменения величины колеи на различных полосах движения кольцевой автомобильной дороги в Санкт-Петербурге как фактора, повышающего вероятность наступления дорожно-транспортного происшествия.

**Ключевые слова:** колея, автомобильная дорога, безопасность дорожного движения, дорожно-транспортное происшествие, дорожная одежда, диагностика.

#### Abstract

The article discusses the causes of wheeltrack formation caused by the dynamic impact of the wheels of vehicles on a roadbed. In the course of the study, the nature of the change in a wheeltrack magnitude on various traffic lanes of the St. Petersburg automobile ring-road is studied as a factor which increases the probability of a traffic accident.

**Keywords:** wheeltrack, motor road, road safety, road traffic accident, road clothing, diagnostics.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-79-85

Автомобильный транспорт является частью единой транспортной системы Российской Федерации, обладает высокой мобильностью и способствует созданию комфорта и удобства при перевозке пассажиров и груза. Наше государство уделяет особое внимание мерам, направленным на повышение безопасности дорожного движения, в частности на снижение количества дорожно-транспортных происшествий (ДТП), сокращение числа людей, получивших ранения или погибших в результате аварии. Однако по сравнению с европейскими странами уровень безопасности дорожного движения в России остается крайне неудовлетворительным [1–7]. Дорожно-транспортные происшествия наносят огромный социальный ущерб гражданам и ложатся тяжелым бременем на систему здравоохранения и экономику в целом. Поэтому повышение безопасности дорожного движения, снижение травматизма, полученного в результате ДТП, и спасение жизней людей — одни из важнейших задач для нашей страны.

Обоснованно выделяют следующие основные факторы, влияющие на безопасность дорожного движения: связанные с человеком (подсистема «Участник дорожного движения»), с транспортным средством (подсистема «Транспортное средство»), с дорогой (подсистема «Автомобильная дорога») и внешней средой (подсистема «Среда») [8–19]. Таким образом, на дорогах существует сложная динамическая система, включающая в себя совокупность элементов (человек, автомобиль, дорога), функционирующих в определенной среде

79

Апрель–Июнь

(УДД – ТС – АД – С) [20]. Эти элементы единой дорожно-транспортной системы находятся в определенных отношениях и связях друг с другом и образуют целостность. Они формируют факторы риска, которые могут привести к ДТП.

Особое место в обеспечении безопасности движения принадлежит дорожным условиям (т.е. транспортно-эксплуатационным характеристикам автомобильных дорог), которые также являются факторами риска возникновения ДТП (рис. 1).

Согласно официальной статистике, около трети всех ДТП происходят по причине ненадлежащего состояния подсистемы «Дорога». Число дорожно-транспортных происшествий за девять месяцев 2022 г., в местах совершения которых были выявлены нарушения обязательных требований к эксплуатационному состоянию и обустройству автомобильных дорог общего пользования, улиц и дорог городов и сельских поселений, составило более 28 тыс. (>30 % от общего числа ДТП) за рассматриваемый период [21].

Несмотря на большое количество теоретических и прикладных исследований, посвященных свойствам дорожных покрытий в течение их жизненного цикла, до настоящего времени вопрос создания дорожной одежды, обладающей наилучшими для заданных условий эксплуатационными качествами, по-прежнему актуален. Один из наиболее распространенных видов дефектов асфальтобетонных поверхностей — результат истирающего воздействия от колеса автомобиля.

Ежегодно в течение более десяти лет в Российской Федерации фиксируется увеличение количества личного автотранспорта (рис. 2), по-прежнему остается значительной и доля грузоперевозок, приходящаяся на автомобильный транспорт. Все это неизбежно ведет к росту такого показателя, как интенсивность дорожного движения на дорогах страны.

На этом фоне в крупных городах, мегаполисах, а также на подъездах к ним обозначилась проблема, ранее не имевшая критического для российских дорог характера, — колейность асфальтобетонного покрытия. Собственно колей представляет собой плавное искажение поперечного профиля дорожного покрытия на полосах наката (рис. 3).

Сегодня вопросы обеспечения устойчивости дорожных покрытий при формировании колеи глубоко изучаются российскими (например, работы [22, 23]) и зарубежными учеными. Новые передовые технологии в производстве помогают улучшить качество прочности материалов в слоях дорожной одежды, в том числе за счет использования инновационных составов смесей и добавок.

Образование колеи происходит из-за воздействия комплекса факторов. Наиболее распространенными причинами возникновения колеи на дорожном полотне принято считать высокую интенсивность движения транспортных средств; увеличение числа тяжеловесного транспорта (на фоне увеличения веса обычных легковых автомобилей за счет постоянно совершенствующейся конструкции механизмов и агрегатов), что, в свою очередь, повышает давление на дорожное покрытие; использование шипованной резины в зимнее время года.

Однако немаловажную роль в процессе колееобразования играет скорость движения транспортных средств по полосе. Данное обстоятельство не так очевидно на небольших

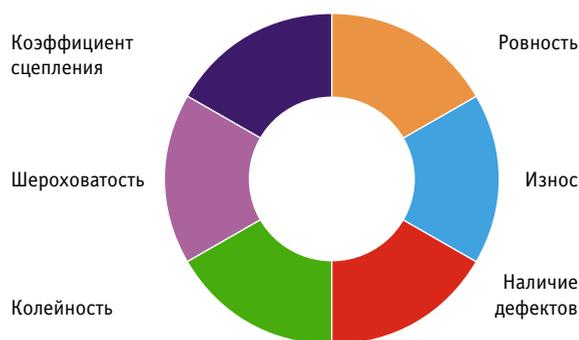


Рис. 1. Факторы риска дорожно-транспортных происшествий на уровне «Состояние дорожного покрытия»

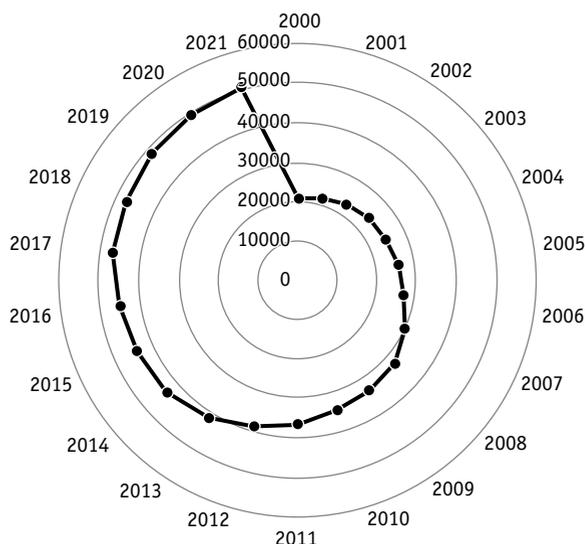


Рис. 2. Автомобилизация в Российской Федерации за 2000–2021 гг.: —●— легковые ТС, шт.



Рис. 3. Поперечный профиль автомобильной дороги с колеями

дорогах (местного, регионального значения) в силу невысоких скоростей движения основного потока, но отнюдь не редкость на автомагистралях, где разрешенная скорость движения составляет 110 км/ч (рис. 4)<sup>1</sup>.

На протяжении многих лет особенности колееобразования на различных типах покрытия и ее устранения остаются одними из важнейших вопросов для дорожников разных стран мира. В России эти проблемы стоят особенно остро, так как интенсивность эксплуатации автомобильных дорог значительно

<sup>1</sup>URL: [territoryengineering.ru/bez-rubriki/dorogi-kotorye-my-vybraem](http://territoryengineering.ru/bez-rubriki/dorogi-kotorye-my-vybraem).



Рис. 4. Колея в левой полосе движения на кольцевой автомобильной дороге (КАД) в Санкт-Петербурге



Рис. 5. Измерительный комплекс дорожной лаборатории

превышает европейскую, соответственно и физическое изнашивание полотна наступает в разы быстрее [24–27]. Вместе с тем исследования свойств и параметров ровности проезжей части в поперечном направлении на российских автомобильных дорогах начались лишь в конце 1990-х гг.

Для изучения колеобразования на дорогах с асфальтобетонным покрытием авторы статьи выбрали участки КАД А-118 — автомобильной дороги общего пользования федерального значения, проходящей по территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Исследования проводились с помощью передвижной дорожной лаборатории по четырем полосам движения на внешнем и внутреннем кольце КАД (рис. 5 и 6).

Результаты, полученные при оценке динамики интенсивности и скоростей движения на КАД за последние 10 лет, представлены на рис. 7 и 8. В качестве характерной выбрана точка на 58-м километре, расположенная на внешнем кольце КАД.

Анализ данных рис. 7 и 8 позволяет сделать вывод, что на исследуемой автомагистрали наибольшая интенсивность движения практически каждый год фиксируется в левой полосе при сохранении достаточно высокого значения средней скорости движения. Это, в свою очередь, при высоких скоро-

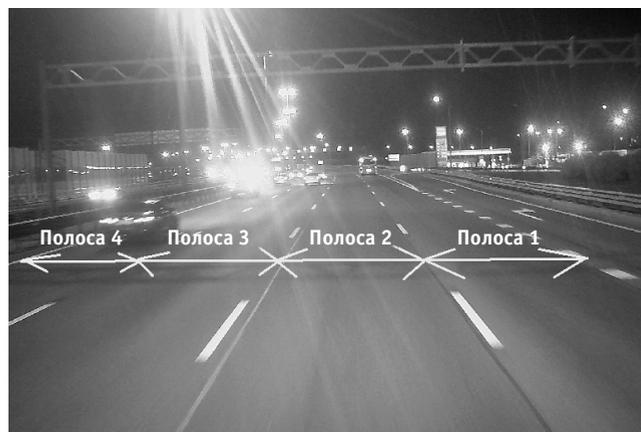


Рис. 6. Исследуемые полосы движения

стях движения ведет к увеличению агрессивного динамического воздействия колес транспортных средств на асфальтобетонное покрытие и, как следствие, к интенсивному истиранию и разрушению дороги.

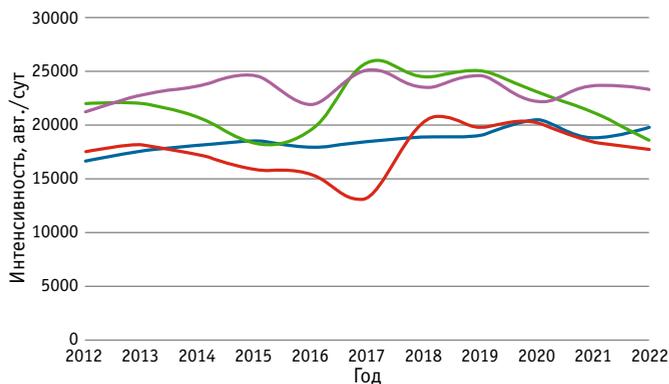


Рис. 7. Динамика интенсивности движения на КАД (Санкт-Петербург) за 2012–2022 гг.:

— полоса 1; — полоса 2; — полоса 3; — полоса 4

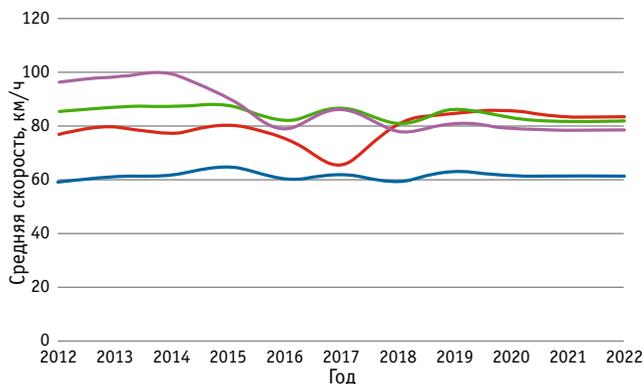
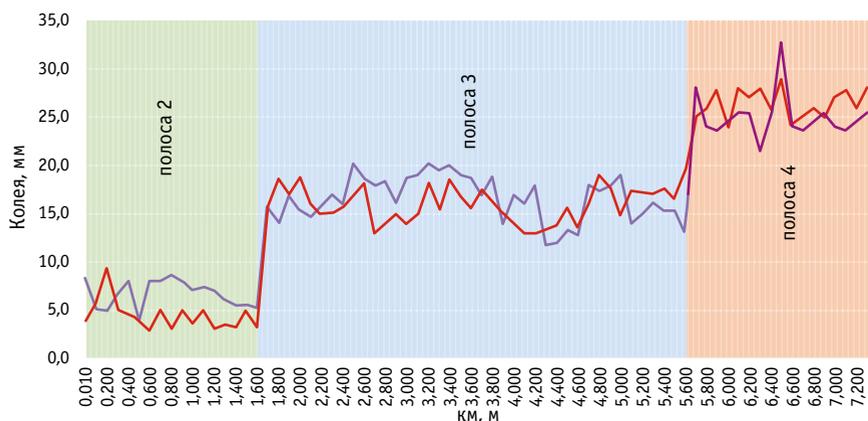
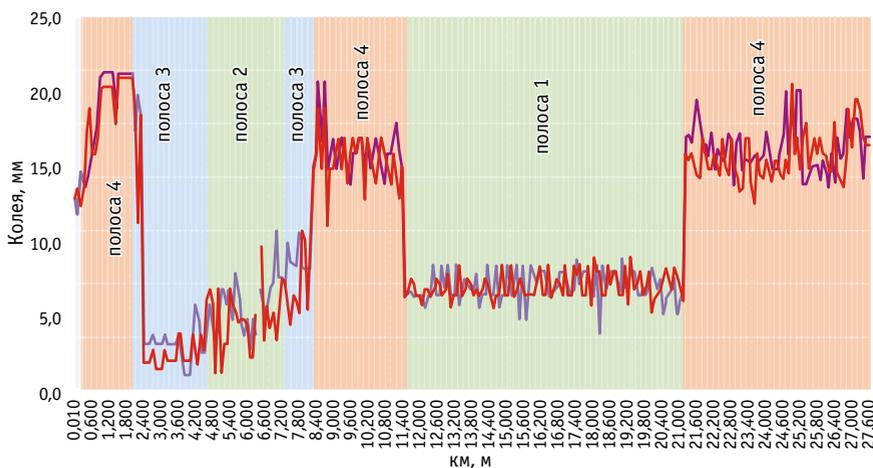


Рис. 8. Динамика средней скорости движения на КАД (Санкт-Петербург) за 2012–2022 гг.:

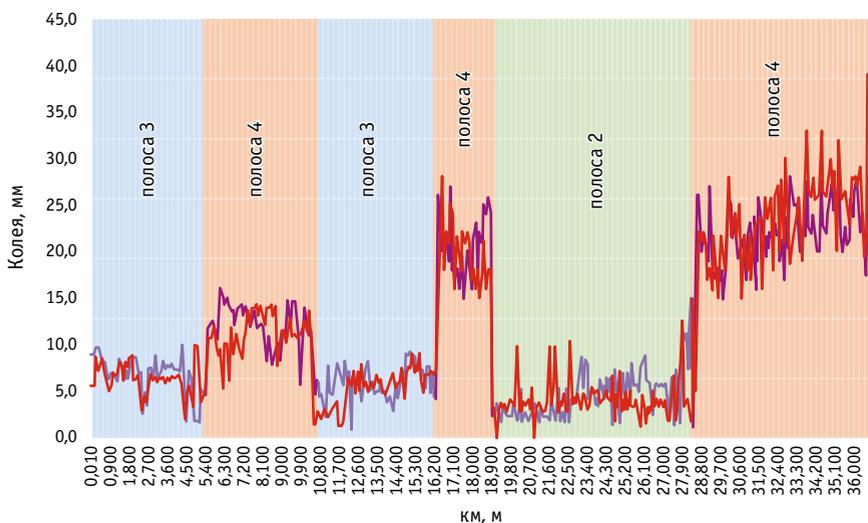
— полоса 1; — полоса 2; — полоса 3; — полоса 4



**Рис. 9. Изменение величины колеи на участке 1:**  
— слева; — справа



**Рис. 10. Изменение величины колеи на участке 2:**  
— слева; — справа



**Рис. 11. Изменение величины колеи на участке 3:**  
— слева; — справа

Известно, что довольно часто колея образуется на крайней левой полосе скоростных дорог с высокой интенсивностью движения транспортных средств, причем по этой полосе в основном едут легковые автомобили. Таким образом, можно предположить, что причиной колееобразования является более интенсивный процесс износа верхнего слоя покрытия при движении высокоскоростных легковых автомобилей.

Чтобы верифицировать гипотезу о возможных причинах образования колеи в левых полосах движения, были выполнены измерения величины левой и правой колеи по полосам наката при движении по четырем полосам. Обработка данных производилась в специализированном программном комплексе. Он представляет собой совокупность систем и программных модулей, предназначенных для решения широкого круга задач, связанных с проведением работ по диагностике и лабораторному контролю автомобильных дорог и аэродромов.

На основе данных, полученных при измерениях, построены графики, отражающие изменение величины левой и правой колеи на полосах движения транспортных средств по КАД. Характер этой зависимости для некоторых из исследуемых участков показан на рис. 9–11.

Полученные графики позволяют убедиться в том, что процесс колееобразования вызван истиранием покрытия от динамического воздействия транспортных средств на дорожное полотно. То есть причина возникновения колеи — многократно повторяющиеся при высоких скоростях автомобиля так называемые удары колеса, в результате которых частицы асфальта выбиваются из покрытия. Соответственно чем выше скорость транспортного средства, тем больше величина энергии и силы удара. Для экспериментального подтверждения сформулированных выводов в процессе исследования было проанализировано, как интенсивность и средние скорости движения транспортных средств по полосам КАД влияют на величину колеи (рис. 12 и 13).

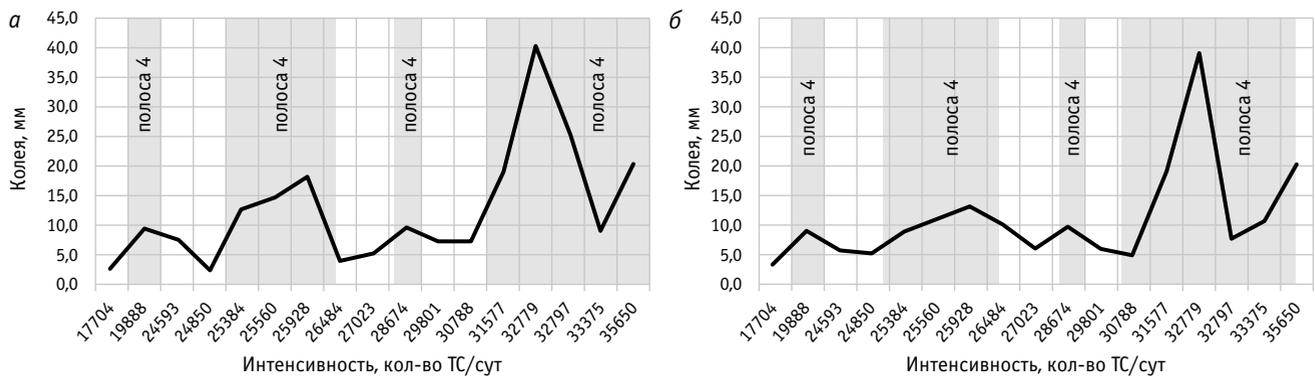


Рис. 12. Динамика изменения величины левой (а) и правой (б) колес на участках с различной интенсивностью движения

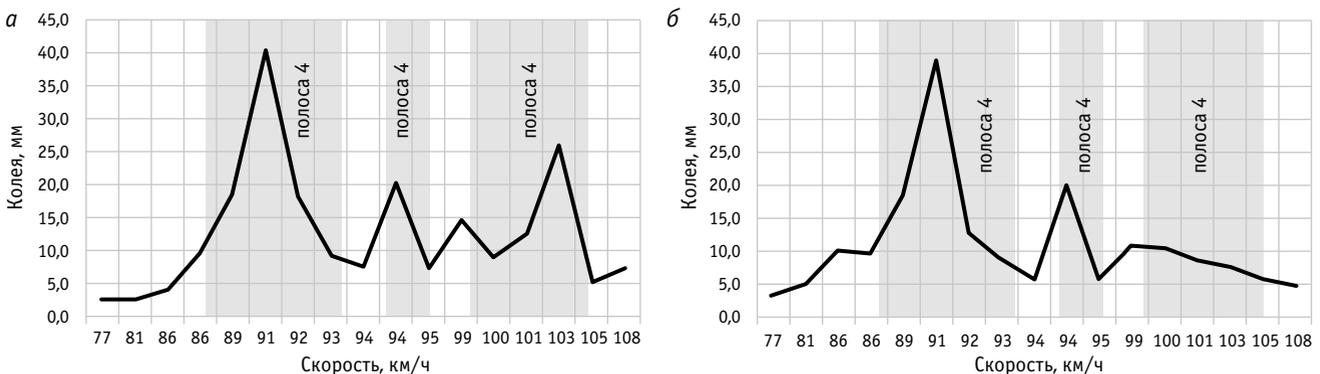


Рис. 13. Динамика изменения величины левой (а) и правой (б) колес на участках с различной средней скоростью движения

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод, что процесс колеобразования как фактор, повышающий вероятность наступления дорожно-транспортного происшествия, в значительной степени зависит от скорости движения потока транспортных средств. Влияние скорости на искажение поперечного профиля автомобильной дороги до сих пор остается недостаточно изу-

ченным. Перспективы исследования этой проблемы состоят в более подробной и детальной оценке факторов, оказывающих воздействие на транспортно-эксплуатационные характеристики автомобильных дорог. В частности, одновременное наличие таких критических элементов, как колея и высокая скорость, создают синергию, эффект от которой проявляется гораздо сильнее.

## Литература

1. Evtukov S., Golov E. Adhesion of car tires to the road surface during reconstruction of road accidents // E3S Web of Conferences : Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019. Moscow : EDP Sciences, 2020. Vol. 164. P. 03022. DOI: 10.1051/e3sconf/202016403022.
2. Evtukov S., Golov E., Sazonova T. Prospects of scientific research in the field of active and passive safety of vehicles // MATEC Web of Conferences. Novosibirsk : EDP Sciences, 2018. Vol. 239. P. 04018. DOI: 10.1051/matecconf/201823904018.
3. Evtukov S. S., Golov E. V., Ivanov N. A. Innovative safety systems for modern vehicles // T-Comm. 2019. Vol. 13. No. 6. Pp. 71–76. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10283.
4. Evtukov S., Golov E., Rajczyk Ja. Improving the accuracy of stiffness coefficient calculation when estimating the kinetic energy spent on vehicle deformation // Architecture and Engineering. 2020. Vol. 5. No. 1. Pp. 45–50. DOI: 10.23968/2500-0055-2020-5-1-45-50.

## References

1. Evtukov S., Golov E. Adhesion of car tires to the road surface during reconstruction of road accidents // E3S Web of Conferences : Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019. Moscow : EDP Sciences, 2020. Vol. 164. P. 03022. DOI: 10.1051/e3sconf/202016403022.
2. Evtukov S., Golov E., Sazonova T. Prospects of scientific research in the field of active and passive safety of vehicles // MATEC Web of Conferences. Novosibirsk : EDP Sciences, 2018. Vol. 239. P. 04018. DOI: 10.1051/matecconf/201823904018.
3. Evtukov S. S., Golov E. V., Ivanov N. A. Innovative safety systems for modern vehicles // T-Comm. 2019. Vol. 13. No. 6. Pp. 71–76. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10283.
4. Evtukov S., Golov E., Rajczyk Ja. Improving the accuracy of stiffness coefficient calculation when estimating the kinetic energy spent on vehicle deformation // Architecture and Engineering. 2020. Vol. 5. No. 1. Pp. 45–50. DOI: 10.23968/2500-0055-2020-5-1-45-50.
5. Indicators of Road Safety as a Phenomenon of National Security of the State / A. Kvitchuk, M. Kvitchuk, S. Evtukov, E. Golov // Lecture Notes in

5. Indicators of Road Safety as a Phenomenon of National Security of the State / A. Kvitchuk, M. Kvitchuk, S. Evtyukov, E. Golov // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 247. Pp. 159–168. DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1\_16.
6. Евтюков С. С., Голов Е. В. Аудит безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах регионального значения в Ленинградской области // *Транспорт Урала*. 2017. № 2 (53). С. 85–89. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-85-89. ISSN 1815-9400.
7. Евтюков С. С., Голов Е. В., Коломеец А. А. Роль человеческого фактора при возникновении дорожно-транспортного происшествия // *Транспортное дело России*. 2019. № 2. С. 196–199. ISSN 2072-8689.
8. Kurakina E., Evtiukov S., Rajczyk Ja. Potential for improving the procedure of inspecting road traffic accident black spots // *Architecture and Engineering*. 2020. Vol. 5. No. 3. Pp. 56–62. DOI: 10.23968/2500-0055-2020-5-3-56-62.
9. Kurakina E., Evtiukov S. Improvement of the system for accounting of parameters during construction of motor roads // *Architecture and Engineering*. 2017. Vol. 2. No. 3. Pp. 34–42.
10. Kurakina E., Evtiukov S. Results of studying road construction parameters' condition // *Architecture and Engineering*. 2018. Vol. 3. No. 1. Pp. 29–37.
11. Kurakina E., Evtiukov S., Ginzburg G. Systemic indicators of road infrastructure at accident clusters // *Architecture and Engineering*. 2020. Vol. 5. No. 1. Pp. 51–58. DOI 10.23968/2500-0055-2020-5-1-51-58.
12. Диагностика состояния подсистемы «Дорога» в системе ВАДС / Ю. Э. Васильев, Я. В. Васильев, С. А. Евтюков [и др.]. Санкт-Петербург : ООО ИД «Петрополис», 2019. 298 с.
13. Голов Е. В. Фактор скорости в системе безопасности дорожного движения // *Вестник гражданских инженеров*. 2021. № 3 (86). С. 139–148. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-3-139-148. ISSN 1999-5571.
14. Добромиров В. Н., Евтюков С. С., Голов Е. В. Организация безопасного дорожного движения на пешеходных переходах // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 6 (65). С. 265–270. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-6-265-270. ISSN 1999-5571.
15. Добромиров В. Н., Евтюков С. С., Куракина Е. В. Совершенствование методов оценки безопасности дорожного движения на скоростных автомобильных дорогах // *Мир транспорта и технологических машин*. 2017. № 1 (56). С. 94–100. ISSN 2073-7432.
16. Формирование трехмерной пространственно-следовой базы исходных данных с использованием сканирующих беспилотных летательных аппаратов и ее интеграция в модельно-ориентированную реконструкцию дорожно-транспортных происшествий / Е. В. Голов, С. А. Евтюков, А. П. Андреев, Е. В. Сорокина // *Транспорт Урала*. 2022. № 1 (72). С. 74–79. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-74-79. ISSN 1815-9400.
17. Куракина Е. В. Диагностическое исследование элементов автомобильных дорог на участках ДТП неразрушающим контролем // *Вестник гражданских инженеров*. 2016. № 6 (59). С. 231–237. ISSN 1999-5571.
18. Куракина Е. В., Лутов Д. А., Мейке У. Н. Оценка уровня содержания и факторов риска автомобильных дорог // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 1 (72). С. 177–183. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-1-177-183. ISSN 1999-5571.
19. Networks and Systems. 2022. Vol. 247. Pp. 159–168. DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1\_16.
6. Evtukov S. S., Golov E. V. Road traffic safety audit on roads of regional importance in Leningrad region [Audit bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na avtomobil'nykh dorogakh regional'nogo znacheniya v Leningradskoy oblasti] // *Transport of the Urals*. 2017. No. 2 (53). Pp. 85–89. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-85-89. ISSN 1815-9400.
7. Evtukov S. S., Golov E. V., Kolomeets A. A. The role of a human factor at formation of the traffic accident [Rol' chelovecheskogo faktora pri vznikenovii dorozhno-transportnogo proisshestviya] // *Transport business of Russia*. 2019. No. 2 (141). Pp. 196–199. ISSN 2072-8689.
8. Kurakina E., Evtiukov S., Rajczyk Ja. Potential for improving the procedure of inspecting road traffic accident black spots // *Architecture and Engineering*. 2020. Vol. 5. No. 3. Pp. 56–62. DOI: 10.23968/2500-0055-2020-5-3-56-62.
9. Kurakina E., Evtiukov S. Improvement of the system for accounting of parameters during construction of motor roads // *Architecture and Engineering*. 2017. Vol. 2. No. 3. Pp. 34–42.
10. Kurakina E., Evtiukov S. Results of studying road construction parameters' condition // *Architecture and Engineering*. 2018. Vol. 3. No. 1. Pp. 29–37.
11. Kurakina E., Evtiukov S., Ginzburg G. Systemic indicators of road infrastructure at accident clusters // *Architecture and Engineering*. 2020. Vol. 5. No. 1. Pp. 51–58. DOI 10.23968/2500-0055-2020-5-1-51-58.
12. Diagnostics of the state of the «Road» subsystem in the «driver — car — road — environment» system [Diagnostika sostoyaniya podsystemy «Doroga» v sisteme VADS] / Yu. E. Vasilyev, Ya. V. Vasilyev, S. A. Evtyukov [et al.]. St. Petersburg : Petropolis, 2019. 298 p.
13. Golov E. V. Speed factor in the road safety system [Faktor skorosti v sisteme bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya] // *Bulletin of Civil Engineers*. 2021. No. 3 (86). Pp. 139–148. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-3-139-148. ISSN 1999-5571.
14. Dobromirov V. N., Evtukov S. S., Golov E. V. Organization of safe traffic at pedestrian crossings [Organizatsiya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na peshkehodnykh perekhodakh] // *Bulletin of Civil Engineers*. 2017. No. 6 (65). Pp. 265–270. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-6-265-270. ISSN 1999-5571.
15. Dobromirov V. N., Evtukov S. S., Kurakina E. V. Improving safety assessment methods of traffic on high-speed roads [Sovershenstvovanie metodov otsenki bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na skorostnykh avtomobil'nykh dorogakh] // *World transport and technological machinery*. 2017. No. 1 (56). Pp. 94–100. ISSN 2073-7432.
16. Creation of 3D spatial and tracking base of initial data with the use of scanning unmanned aerial vehicles and its integration into model-oriented reconstruction of traffic accidents [Formirovanie trekhmernoy prostanstvenno-sledovoy bazy iskhodnykh dannykh s ispol'zovaniem skaniruyushchikh bespilotnykh letatel'nykh apparatov i ee integratsiya v model'no-orientirovannuyu rekonstruktsiyu dorozhno-transportnykh proisshestviy] / E. V. Golov, S. A. Evtukov, A. P. Andreev, E. V. Sorokina // *Transport of the Urals*. 2022. No. 1 (72). Pp. 74–79. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-74-79. ISSN 1815-9400.
17. Kurakina E. V. Diagnostic work-up of the motor road elements at the site of traffic accident by non-destructive testing technique [Diagnosticheskoe issledovanie elementov avtomobil'nykh dorog na uchastkakh DTP nerazrushayushhim kontrolem] // *Bulletin of Civil Engineers*. 2016. No. 6 (59). Pp. 231–237. ISSN 1999-5571.
18. Kurakina E. V., Lutov D. A., Meyke U. N. Assessment of the road maintenance and risk factors of automobile roads [Otsenka urovnya sodержaniya i faktorov riska avtomobil'nykh dorog] // *Bulletin of Civil Engineers*. 2019. No. 1 (72). С. 177–183. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-1-177-183. ISSN 1999-5571.
19. Kurakina E. V., Sklyarova A. A. Road safety improvement in road traffic participant — vehicle — road — external environment system [Povyshenie urovnya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v sisteme «uchastnik dorozhnogo dvizheniya — transportnoe sredstvo — doroga — vneshnyaya sreda»] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*.

19. Куракина Е. В., Склярова А. А. Повышение уровня безопасности дорожного движения в системе «участник дорожного движения — транспортное средство — дорога — внешняя среда» // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17. № 4 (74). С. 488–499. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-4-488-499. ISSN 2071-7296.
20. Позднышов А. Н., Смирнова Е. С. Анализ основных факторов, влияющих на безопасность дорожного движения // Юристъ-Правоведъ. 2012. № 2 (51). С. 28–33. ISSN 1817-7093.
21. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 15.02.2023).
22. Серова О. В., Герасимов В. С. Анализ применимости современных технологий ремонта и борьбы с колеобразованием на дорогах // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 10-1. С. 102–106. ISSN 2073-0071.
23. Поздняков М. К. Исследование сопротивляемости асфальтобетона колеобразованию // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2009. № 3. С. 16–20. ISSN 2071-7318.
24. Ковалев Д. И., Шайхутдинова Р. А. Проблемы колеобразования на автомобильных дорогах // Транспортные сооружения. 2022. Т. 9. № 1. DOI: 10.15862/10SATS122.
25. Медрес Е. Е., Голов Е. В., Бабенко Т. И. Факторы, влияющие на равномерность движения автомобильного транспорта в условиях насыщенных транспортных потоков // Транспортное дело России. 2017. № 2. С. 89–90. ISSN 2072-8689.
26. Методика обоснования оптимального уровня проектной надежности при проектировании дорожных одежд / Н. А. Карамышева, М. Г. Горячев, С. В. Лугов, Е. В. Каленова // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2022. № 4 (34). eISSN 2409-7217.
27. Повышение безопасности дорожного движения на основе совершенствования структуры отраслевой диагностики федеральных автомобильных дорог / А. В. Кочетков, А. А. Сухов, А. С. Козин [и др.] // Вестник СамГУПС. 2013. № 1 (19). С. 54–61. ISSN 2079-6099.
2020. Vol. 17. No. 4 (74). Pp. 488–499. DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-4-488-499. ISSN 2071-7296.
20. Pozdnyshov A. N., Smirnova E. S. Analysis of the main factors affecting road safety [Analiz osnovnykh faktorov, vliyayushhikh na bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya] // Jurist-Pravoved. 2012. No. 2 (51). Pp. 28–33. ISSN 1817-7093.
21. Federal State Statistics Service [Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki]. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (access date: 15.02.2023).
22. Serova O. V., Gerasimov V. S. Analyzing the applicability of modern technologies for repairing and counteracting the wheeltrack formation on roads [Analiz primenimosti sovremennykh tekhnologiy remonta i bor'by s koleeobrazovaniem na dorogakh] // Current challenges of humanitarian and natural sciences. 2016. No. 10-1. Pp. 102–106. ISSN 2073-0071.
23. Pozdnyakov M. K. Studying the resistance of asphalt concrete to wheel-track formation [Issledovanie soprotivlyaemosti asfal'tobetona koleeobrazovaniyu] // Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 2009. No. 3. Pp. 16–20. ISSN 2071-7318.
24. Kovalev D. I., Shaykhtudinova R. A. Wheel track rutting problems on highways [Problemy koleeobrazovaniya na avtomobil'nykh dorogakh] // Russian Journal of Transport Engineering. 2022. Vol. 9. No. 1. DOI: 10.15862/10SATS122.
25. Medres E. E., Golov E. V., Babenko T. I. The factors influencing uniformity of the movement of the motor transport in the conditions of saturated transport streams [Faktory, vliyayushhie na ravnomernost' dvizheniya avtomobil'nogo transporta v usloviyakh nasyshhennykh transportnykh potokov] // Transport business of Russia. 2017. No. 2. Pp. 89–90. ISSN 2072-8689.
26. Methodology for substantiation of the optimum level of design reliability in the design of pavements [Metodika obosnovaniya optimal'nogo urovnya proektnoy nadezhnosti pri proektirovani dorozhnykh odezhd] / N. A. Karamysheva, M. G. Goryachev, S. V. Lugov, E. V. Kalenova // Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. 2022. No. 4 (34). ISSN e2409-7217.
27. Efficient structure of federal roads diagnosis as a factor of improving traffic safety [Povyshenie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na osnove sovershenstvovaniya struktury otraslevoy diagnostiki federal'nykh avtomobil'nykh dorog] / A. V. Kochetkov, A. A. Sukhov, A. S. Kozin [et al.] // Vestnik SamGUPS. 2013. No. 1 (19). Pp. 54–61. ISSN 2079-6099.

Объем статьи 0,88 авторских листа

УДК 656.078

Римма Видадиевна Панкина, старший преподаватель кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## О ТЕНДЕНЦИЯХ РОССИЙСКОГО КОНТЕЙНЕРНОГО РЫНКА

Rimma Vidadieva Pankina, Senior Lecturer, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Regarding the trends of the Russian container shipping market

#### Аннотация

Тренд на контейнеризацию поддерживается в течение последних нескольких лет, но в настоящее время его планомерное развитие испытывает воздействие макроэкономических ограничений, таких как санитарно-эпидемиологическая ситуация, закрытие границ, переориентация грузопотока с Запада на Восток. Основные зарубежные операторы ушли с российского рынка, и сегодня в нашей стране происходит активный процесс наращивания собственного контейнерного парка, а следовательно, вопросы, связанные с его управлением и эффективным использованием, становятся особенно актуальными. В статье сделан обзор состояния российского рынка железнодорожных контейнерных перевозок и проанализированы факторы, повлиявшие на изменение структуры контейнерных перевозок.

**Ключевые слова:** контейнеризация, контейнерный парк, эффективность управления парком, техническое нормирование контейнерных перевозок.

#### Abstract

The trend towards containerization has been maintained over the past few years, but currently its systematic development is being affected by macroeconomic constraints, such as the sanitary and epidemiological situation, border closures, and the reorientation of cargo traffic from West to East. The major foreign operators have left the Russian market, and currently there is an active process of building up our own container fleet in the country, and consequently, issues related to its management and effective use are becoming particularly relevant. The article presents an overview of the state of the Russian railway shipping container transportation market and analyzes the factors which affected the change in the structure of container transportation.

**Keywords:** containerization, container fleet, container fleet management efficiency, technical rationing of container transportation.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-86-91

В развитии российской транспортной отрасли важную роль играет направление контейнеризации, служащее инструментом повышения производительности перевозок. Тренд на контейнеризацию поддерживается в нашей стране достаточно длительное время. В частности, за период с 2017 по 2021 г. отмечен стабильно высокий рост контейнерных железнодорожных перевозок (рис. 1). Это обусловлено следующим:

- сравнительно низкой себестоимостью доставки грузов по отношению к перевозкам автомобильным транспортом и повагонным отправкам;
- высокой скоростью доставки грузов контейнерными поездами из-за отсутствия сортировок на участковых и сортировочных станциях в пути следования;
- регулярностью курсирования контейнерных поездов и четко выделенным расписанием;
- возможностью перевозки грузов всех классов;
- обеспечением высокого уровня безопасности и снижением рисков, связанных с повреждениями груза.

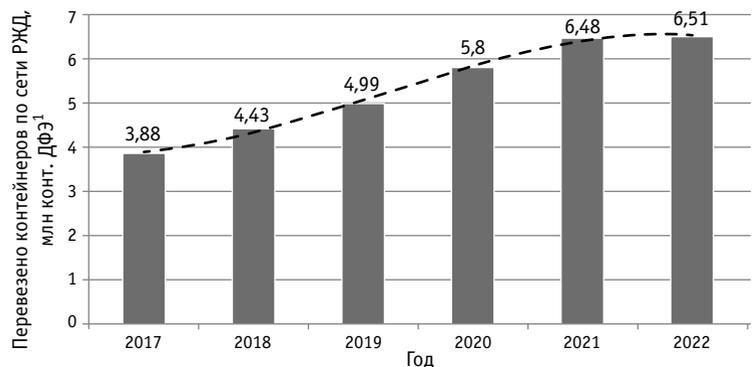


Рис. 1. Динамика перевезенных контейнеров по сети ОАО «РЖД» в 2017–2022 гг.

Однако ситуация кардинально изменилась в 2022 г. Рынок железнодорожных перевозок подвергся ряду санитарно-эпидемиологических, экономических и политических ограничений. Сказалось снижение транспортной подвижности в некоторых регионах. В результате закрытия границ была приостановлена работа ряда терминальных комплексов. Заблокированными оказались направления Балтики и Черноморья [1].

¹ДФЭ — условная единица учета парка контейнеров, за которую принят 20-футовый контейнер.

В первой половине 2022 г. грузопоток был перенаправлен с Запада на Восток, организована доставка грузов по проектам параллельного импорта. Все это сказалось на загрузке Восточного полигона [2], что вызвало необходимость в увеличении провозной и пропускной способности линий [3].

Причинно-следственные связи между ограничениями, повлиявшими на работу российской транспортной системы, и изменениями структуры контейнерного рынка показаны на рис. 2 в виде диаграммы Исикавы.

По данным Института проблем естественных монополий (ИПЕМ), в начале прошлого года прогноз предполагал сокращение объемов перевозок грузов в контейнерах более чем на 20 % [4]. Ожидался спад погрузки на сети железных дорог до 10 % по всем категориям грузов. Эксперты связывали это с действием санкционных и транспортных ограничений. Но фактически количество перевезенных контейнеров в 2022 г. осталось на уровне 6,51 млн ДФЭ, что на 0,3 % превысило показатели 2021 г. (см. рис. 1).

Сохранить стабильность на рынке контейнерных перевозок удалось за счет переориентации различных категорий грузов. Изменилась и сама структура грузопотока. Прирост дали такие категории грузов, как химические удобрения: более чем на 150 % к 2021 г. Заметно увеличились перевозки нефти и нефтепродуктов в контейнерах — на 12,4 %. Существенный при-

рост отмечен в категориях бумаги, химикатов и сборных грузов. В связи с восстановительными работами на вновь присоединенных территориях на 20 % выросли перевозки строительных грузов в контейнерах (рис. 3).

Вместе с тем по сравнению с 2021 г. снизились контейнерные перевозки автомобилей и автокомплекующих (на 19 %), цветной руды (на 15 %), цветных и черных металлов (соответственно на 15 и 5 %) (см. рис. 3).

Макроэкономические ограничения оказали серьезное влияние и на зарубежных участников контейнерных перевозок. Прекратили работу на российском рынке и вывели свои активы такие контейнерные операторы, как Maersk, CMA CGM ONE (Ocean Network Express), Nagag-Lloyd, Yang Ming и др., на долю которых приходилось около 50 % импортного и 60 % экспортного товарооборота нашей страны. Это привело к приостановке работы в некоторых морских портах, тем самым в блокаде оказались Балтийский и Черноморский бассейн [1].

Такая «транспортная блокада» повлекла за собой ряд проблем:

- дефицит контейнерного парка и парка подвижного состава для внутрироссийской перевозки контейнеров;
- ограничение работы терминальных комплексов;
- необходимость переориентирования грузопотоков с Запада на Восток.

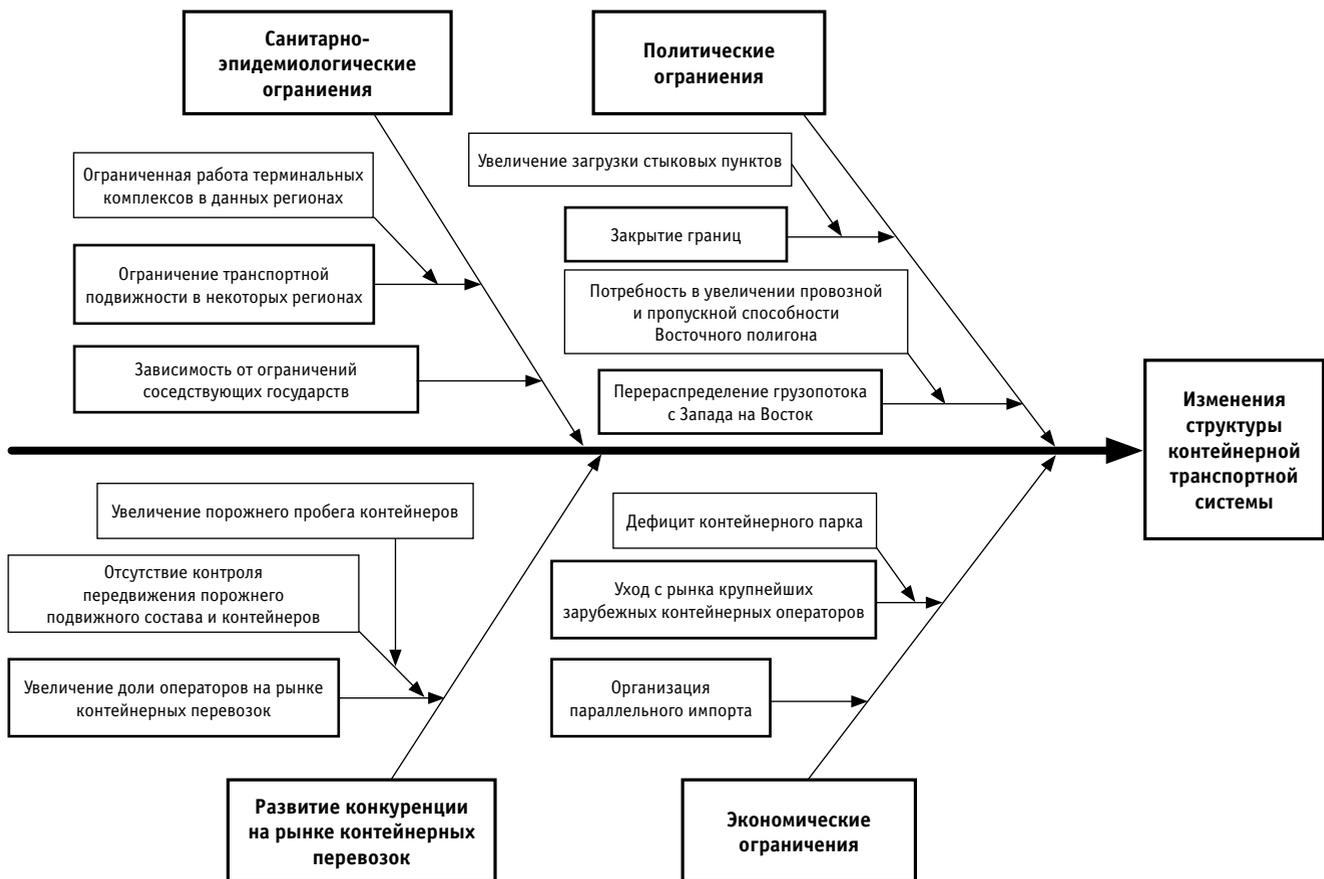


Рис. 2. Диаграмма причинно-следственного анализа изменения структуры контейнерного рынка

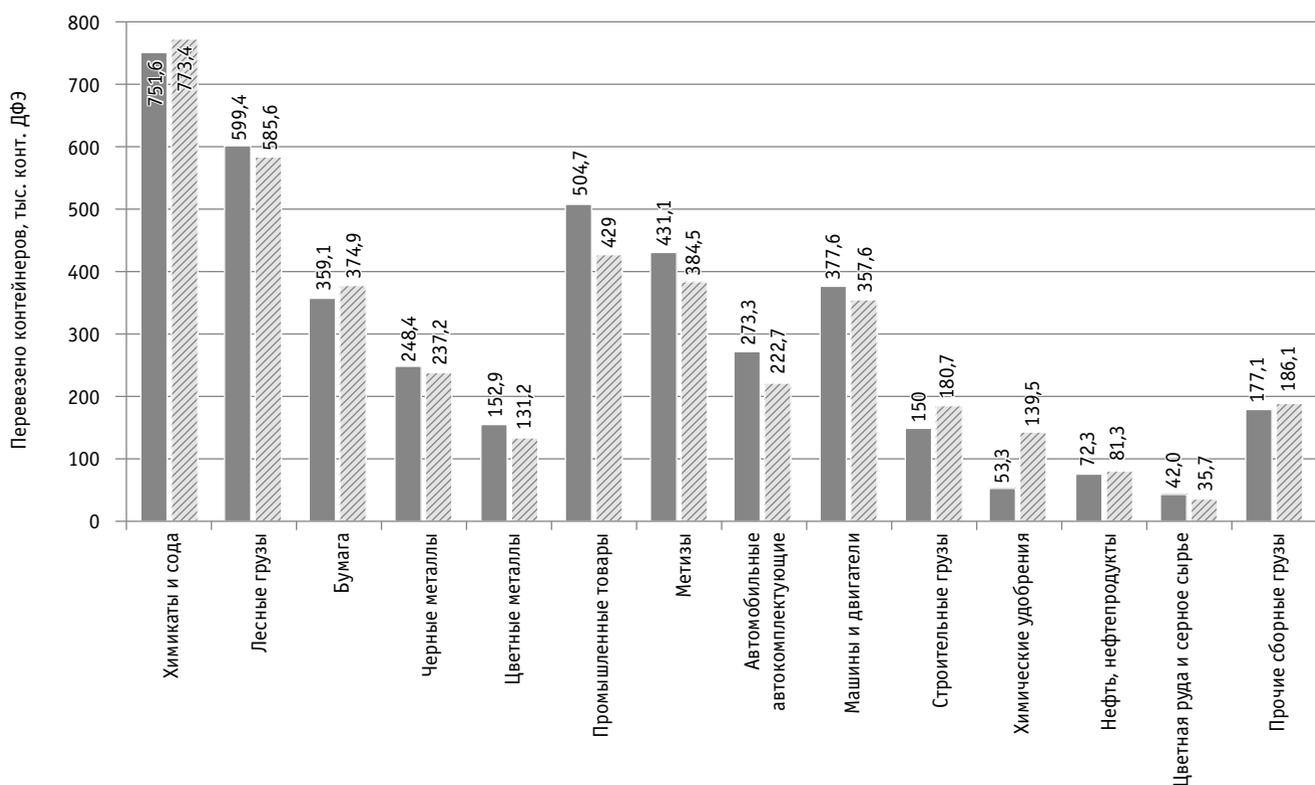


Рис. 3. Основные виды грузов, перевезенных в контейнерах по сети ОАО «РЖД» в 2021 и 2022 гг.:

■ — 2021; ▨ — 2022

Вместе с тем крупные отечественные операторы контейнерных перевозок, такие как АО «РЖД Бизнес Актив», АО «ФГК», ООО «ЛОГОПЕР», ООО «Таскор-2», FESKO, ПАО «ТрансКонтейнер», получили возможность занять рынок. Они своевременно отреагировали на произошедшие изменения и заявили о намерении увеличить долю собственных активов, освоить новые маршруты, выделить новые контейнерные поезда, построить новые терминалы.

Контейнерный оператор АО «РЖД Бизнес Актив», дочернее предприятие ОАО «РЖД», имеет в собственности более 5 тыс. платформ и около 12 тыс. контейнеров. Под руководством компании находится 11 терминалов. В планах — приобретение 11 тыс. контейнеров к 2024 г. и открытие собственного терминала на границе с КНР [5].

АО «ФГК» в перспективе планирует запуск специализированных контейнеров типа open top, hard top, bulk и увеличение парка фитинговых платформ [6].

Оператор рефрижераторных вагонов ООО «Таскор-2» в ближайшей перспективе намерен приобрести собственные активы — фитинговые платформы и рефрижераторные контейнеры, тем самым поддерживая тренд на контейнеризацию. Новые перспективные маршруты планируется освоить в направлении Ирана, Ирака и Турции [7].

Транспортная компания FESKO, которая является одним из крупнейших операторов контейнерного парка и имеет в собственности 135 тыс. контейнеров и 10 тыс. фитинговых плат-

форм, заявила о глобальных планах работы на направлениях Средней Азии, Южной Кореи, Узбекистана [8].

Сегодня перенаправленный грузопоток в сторону Востока осваивается отечественными операторами, в данном направлении растет и транзитный контейнерный поток. Это привело к повышению загрузки стыковых пунктов и портов,кратно возросла работа пограничных переходов (Китай, Монголия, Казахстан), увеличилась нагрузка на порты Дальнего Востока, обеспечивающие импортное сообщение между портами Японии и Кореи.

Географию контейнерных перевозок последних двух лет можно проиллюстрировать на примере работы транспортной системы Свердловской железной дороги (рис. 4).

Как видно из рис. 4, значительно сократились отправки из Северной и Южной Америки, снизилась работа СВЖД с европейскими государствами, однако число отправок из стран Африки и из Китая увеличилось. Что касается отправок контейнеров со Свердловской железной дороги, оно выросло в направлении Китая, Казахстана, Монголии. Таким образом, очевидно, что контейнеропотоки смещаются с Запада на Восток.

Эффективность контейнерных перевозок оценивается как количественными (среднесуточные объемы погрузки и выгрузки, прием и сдача контейнеров, количество вагонов, загруженных контейнерами), так и качественными (время оборота контейнера, статическая нагрузка, производительность контейнера, коэффициент порожнего и груженого пробега) показателями.

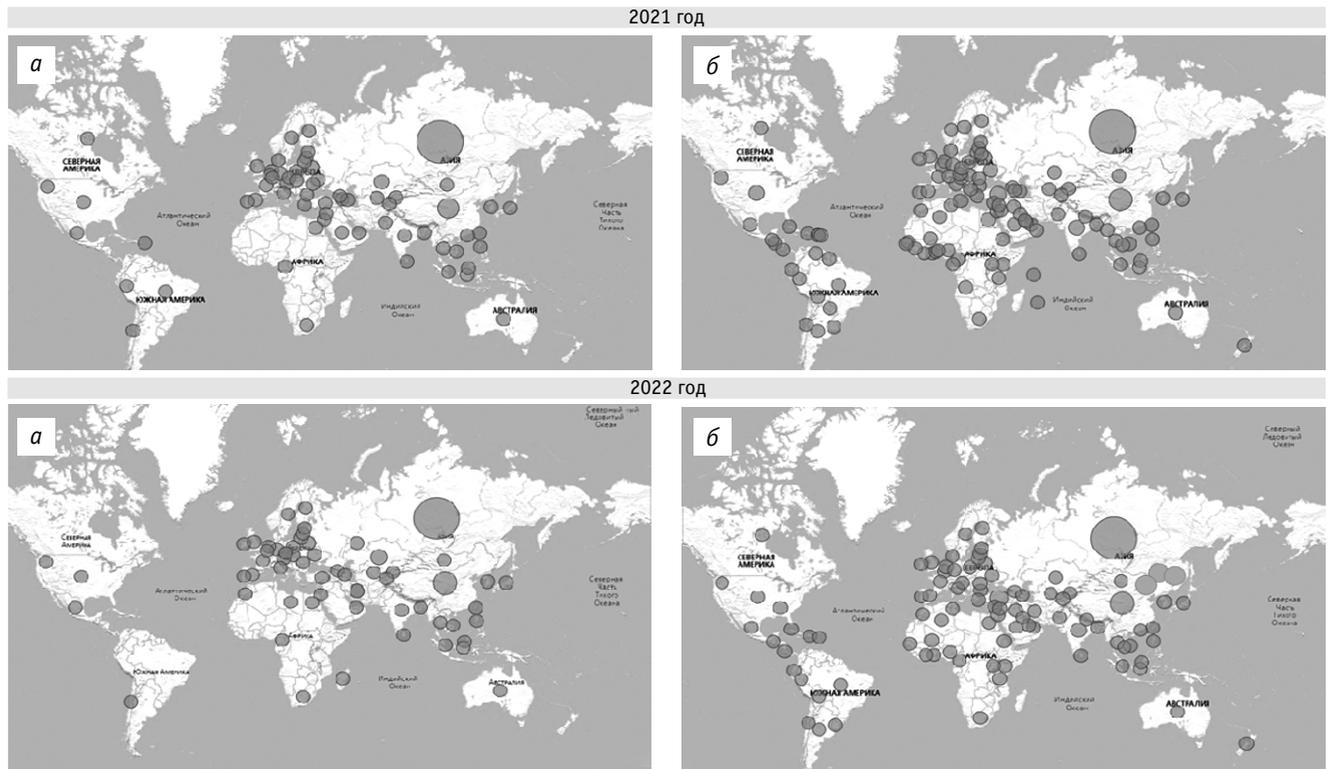


Рис. 4. География отправления (а) и приема (б) контейнеров на станциях Свердловской железной дороги за 2021–2022 гг.

Один из наиболее важных показателей — оборот контейнера, сут, который рассчитывается по формуле

$$\Theta_k = \frac{1}{24} \left( \frac{L_{\text{п}}^k}{V_{\text{уч}}} + \frac{L_{\text{п}}^k}{L_{\text{тех}}} \cdot t_{\text{тех}} + \frac{t_{\text{м}}^{\text{ст}}}{K_{\text{сдв}}} \cdot k_{\text{м}} + \frac{N_{\text{сорт}}}{U_{\text{р}}} \cdot t_{\text{сорт}} \right),$$

- где  $L_{\text{п}}^k$  — полный рейс контейнера, км;
- $V_{\text{уч}}$  — участковая скорость, км/ч;
- $L_{\text{тех}}$  — среднее расстояние между техническими станциями, км;
- $t_{\text{тех}}$  — среднее время нахождения вагона на технической станции, ч;
- $t_{\text{м}}^{\text{ст}}$  — среднее время нахождения контейнера под грузовой операцией, ч;
- $K_{\text{сдв}}$  — коэффициент двояных операций;
- $k_{\text{м}}$  — коэффициент местной работы;
- $N_{\text{сорт}}$  — общее число транзитных переработанных контейнеров;
- $U_{\text{р}}$  — работа контейнерного парка;
- $t_{\text{сорт}}$  — среднее время нахождения транзитного контейнера на станции сортировки, ч.

Рассмотрим, как менялись некоторые из показателей, на примере ПАО «ТрансКонтейнер» [9]. Оборот контейнеров, принадлежащих компании, планомерно снижался на протяжении пяти лет (рис. 5). Значительное сокращение этого показателя свидетельствует о более эффективном использовании контейнерного парка. Однако отмечено увеличение оборота

специализированных платформ, что обусловлено рассмотренными выше ограничениями.

Сегодня ускорение оборота позволяет наиболее эффективно использовать контейнерный парк, т.е. повышает его производительность и, как следствие, увеличивает прибыль компаний-операторов. Так, в условиях, когда с рынка ушли крупные контейнерные операторы и значительно сократился контейнерный парк, ускорение оборота скорее является вынужденной мерой.

Еще один важный показатель операционной эффективности контейнерных перевозок — коэффициент порожнего пробега, показывающий, какая доля последнего приходится на общий пробег (табл. 1).

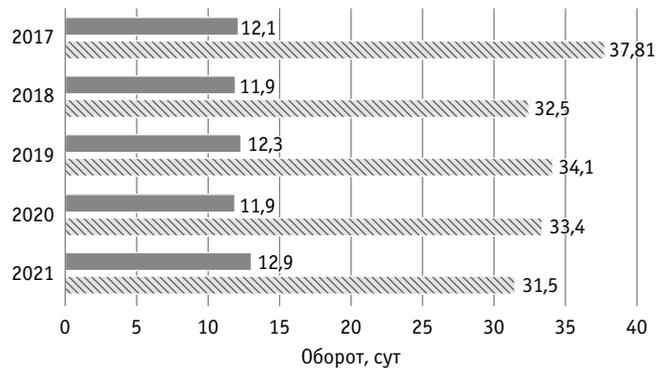


Рис. 5. Динамика оборота контейнеров и фитинговых платформ ПАО «ТрансКонтейнер» в 2017–2021 гг.: ■ — фитинговые платформы; ▨ — контейнеры

Таблица 1

Динамика коэффициента порожнего пробега контейнеров и фитинговых платформ ПАО «ТрансКонтейнер» в 2017–2021 гг., %

Год	Контейнеры	Фитинговые платформы
2017	19,2	3,9
2018	17,6	3,0
2019	17,2	4,2
2020	17,0	3,4
2021	14,0	4,3

Снижение коэффициента порожнего пробега контейнеров за последние пять лет говорит о более точном планировании перевозочного процесса. Но даже при такой положительной динамике из-за влияния внешних факторов рынок контейнерных перевозок остается нестабильным. Ограничения, которые он испытывает за последний год, вызывают «турбулентность» контейнерных перевозок.

Отметим, что при организации перевозочного процесса управление контейнерным парком осуществляется на основании месячных технических норм, которые опираются на кон-

кретные размеры перевозочной работы [10]. Так определяется оптимальное распределение транспортных средств на планируемые объемы работы, после чего устанавливаются нормативные показатели по использованию вагонных и контейнерных парков [11].

В современных условиях из-за неравномерности перевозок определить месячные размеры работы достаточно трудно. Кроме того, система расчета месячного планирования, которая сложилась в периоды стабильности перевозок, не позволяет быстро реагировать на изменения рынка [12]. Вероятно, одним из вариантов решения проблемы может стать сокращение периода нормирования до декады, недели или пяти дней, но на практике реализовать это достаточно затруднительно.

Ограничения, с которыми столкнулась транспортная отрасль России, сыграли важную роль в развитии контейнерных перевозок на отечественном рынке — ускорили тренд на контейнеризацию. Несмотря на происходящие перемены, доля контейнерных перевозок в общем объеме увеличивается. Тенденция по объемам и направлениям меняется, возрастает динамичность перевозок. Вместе с тем применяемая сегодня в организации контейнерных перевозок система месячного технического нормирования не позволяет своевременно реагировать на изменения. Поэтому при планировании эксплуатационной работы и управлении контейнерным парком следует использовать методы оптимизации.

## Литература

1. Россия в морской блокаде. URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1685/95363> (дата обращения: 12.02.2023).
2. Куренков П. В., Мадяр О. Н., Астафьев А. В. Мероприятия по развитию железнодорожной инфраструктуры Восточного полигона и участка Междуреченск — Тайшет // Транспорт: наука, техника, управление. 2022. № 7. С. 11–15. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-07-2. ISSN 0236-1914.
3. Щербанин Ю. А. Сибирь — Дальний Восток: грузоперевозки в направлении морских портов, влияние внешних факторов // Вопросы новой экономики. 2022. № 2 (62). С. 47–58. DOI: 10.52170/1994-0556\_2022\_62\_47. ISSN 1994-0556.
4. Тренды в логистике-2022: контейнеризация и расширение географии перевозок. URL: [https://trcont.com/press-centre/media-coverage/-/asset\\_publisher/4LF0rLLFdhVc/content/coverage\\_trc\\_ria\\_11\\_05\\_22](https://trcont.com/press-centre/media-coverage/-/asset_publisher/4LF0rLLFdhVc/content/coverage_trc_ria_11_05_22) (дата обращения: 20.01.2023).
5. Сараев В. Неизменный курс // Гудок. 2022. 14 дек. С. 4.
6. Воронович В. Новые технологии как драйвер развития // Гудок. 2022. 14 дек. С. 4.
7. Момот В. Выход за рубеж // Гудок. 2022. 14 дек. С. 4.
8. Гусаченко Н. FESCO: контейнерный рынок России по итогам 2022 года сократился на 15,9 %. URL: <https://www.rzd-partner.ru/logistics/news/fesco-konteynernyy-rynok-rossii-po-itogam-2022-goda-sokratilsya-na-15-9-/> (дата обращения: 26.01.2023).
9. Годовой отчет ПАО «ТрансКонтейнер» за 2021 г. URL: <https://ar2021.trcont.com/ru/results-overview/operational-results/assets> (дата обращения: 20.01.2023).

## References

1. Russia is under a naval blockade [Rossiya v morskoy bloкаде]. URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1685/95363> (access date: 12.02.2023).
2. Kurenkov P. V., Madyar O. N., Astafiev A. V. Measures for the development of the railway infrastructure of the Eastern polygon and the section of Mezhdurechensk — Taishet [Meropriyatiya po razvitiyu zheleznodorozhnoy infrastruktury Vostochnogo poligona i uchastka Mezhdurechensk — Tayshe] // Transport: science, equipment, management. 2022. No. 7. Pp. 11–15. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-07-2. ISSN 0236-1914.
3. Shcherbanin Yu. A. Siberia — Far East: cargo transportation towards maritime ports, impact of external factors [Sibir' — Dal'niy Vostok: gruzoperevozki v napravlenii morskikh portov, vliyanie vneshnikh faktorov] // Issues of New Economy. 2022. No. 2 (62). Pp. 47–58. DOI: 10.52170/1994-0556\_2022\_62\_47. ISSN 1994-0556.
4. Trends in logistics-2022: containerization and expansion of the geography of transportation [Trendy v logistike-2022: konteynerizatsiya i rasshirenie geografii perevozok]. URL: [https://trcont.com/press-centre/media-coverage/-/asset\\_publisher/4LF0rLLFdhVc/content/coverage\\_trc\\_ria\\_11\\_05\\_22](https://trcont.com/press-centre/media-coverage/-/asset_publisher/4LF0rLLFdhVc/content/coverage_trc_ria_11_05_22) (access date: 20.01.2023).
5. Saraev V. The invariable course [Neizmennyy kurs] // Gudok. 2022. December 14. P. 4.
6. Voronovich V. New technologies as a driver for development [Novye tekhnologii kak drayver razvitiya] // Gudok. 2022. December 14. P. 4.
7. Momot V. Exit to overseas [Vykhod za rubezh] // Gudok. 2022. December 14. P. 4.
8. Gusachenko N. FESCO: the container shipping market of Russia by the end of 2022 decreased by 15.9 % [FESCO: konteynernyy rynek Rossii po itogam 2022 goda sokratilsya na 15,9 %]. URL: <https://www.rzd-partner.ru/logistics/news/fesco-konteynernyy-rynok-rossii-po-itogam-2022-goda-sokratilsya-na-15-9-/> (access date: 26.01.2023).
9. PJSC «TransContainer» annual report for 2021 [Godovoy otchet PAO «TransKonteyner» za 2021 g.]. URL: <https://ar2021.trcont.com/ru/results-overview/operational-results/assets> (access date: 20.01.2023).

10. Шенфельд К. П. Развитие методов управления перевозочным процессом в условиях рыночной экономики и реформирования железнодорожного транспорта : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2014. 286 с.
11. Резер С. М. Логистика экспедирования грузовых перевозок. Москва : ВИНТИ РАН, 2002. 496 с.
12. Югрина О. П., Жарикова Л. С. Особенности работы железнодорожного полигона с порожним вагонопотоком // Транспорт Урала. 2022. № 1 (72). С. 24–29. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-24-29. ISSN 1815-9400.

10. Shenfel'd K. P. Development of methods of transportation process management in the conditions of a market economy and a railway transport reform [Razvitie metodov upravleniya perevozochnym protsessom v usloviyakh rynochnoy ekonomiki i reformirovaniya zheleznodorozhnogo transporta] : DSc in Engineering Thesis. Moscow, 2014. 286 p.
11. Rezer S. M. Logistics of freight forwarding transportations [Logistika ekspedirovaniya gruzovykh perevozok]. Moscow : All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Science, 2002. 496 p.
12. Yugrina O. P., Zharikova L. S. Features of operation of railway polygon with empty car traffic [Osobennosti raboty zheleznodorozhnogo poligona s porozhnim vagonopotokom] // Transport of the Urals. 2022. No. 1 (72). Pp. 24–29. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-24-29. ISSN 1815-9400.

*Объем статьи 0,64 авторских листа*

УДК 621.3.048

Евгений Александрович Третьяков, доктор технических наук, профессор кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Олег Владимирович Балагин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», проректор по цифровой трансформации и связи с производством Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Сергей Владиславович Живушко, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Кайрат Арманович Калинин, студент Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия, Эрмек Есиркепов, студент Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СУШКИ УВЛАЖНЕННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВЗОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ДЕПО

Evgeniy Alexandrovich Tretyakov, DSc in Engineering, Professor, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Oleg Vladimirovich Balagin, PhD in Engineering, Associate Professor, Locomotives Department, Vice-rector for Vocational Training and Relations with Industry, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Sergey Vladislavovich Zhivushko, postgraduate student, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Kayrat Armanovich Kalin, student, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Ermek Esirkepov, student, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

## Testing results of humidified insulation drying of traction electric engines of electric locomotives based on electrokinetic phenomena in depot conditions

### Аннотация

Представлены результаты испытаний электроосмотической сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей электровозов в условиях сервисного локомотивного депо. На основе разработанного авторами устройства предложена технология проведения электроосмотической сушки (совместно с электрокалориферной) в период отрицательных температур воздуха. Результаты испытаний свидетельствуют о снижении расхода электроэнергии до 60 % и сокращении времени простоя электровозов при ТР-1 на 20 %.

**Ключевые слова:** электровоз, тяговый электрический двигатель, изоляция, калориферная сушка, электроосмос, сопротивление изоляции.

### Abstract

The testing results of electroosmotic drying of humidified insulation of traction electric engines of electric locomotives in the conditions of a service locomotive depot are presented in the article. The technology of electroosmotic drying (combined with electrocaloriferous) during the period of sub-freezing air temperatures, based on the device developed by the authors, is proposed. The testing results indicate up to 60 % reduction in electricity consumption and a reduction in the idle time of electric locomotives at TR-1 by 20 %.

**Keywords:** electric locomotive, traction electric engine, insulation, caloriferous drying, electric osmosis, insulation resistance.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-92-96

**В** период отрицательных температур наблюдается значительное увеличение отказов тяговых электродвигателей (ТЭД) электровозов (рис. 1), что обусловлено в том числе увлажнением изоляции обмоток. При попадании теплого воздуха на поверхность изоляции он охлаждается, уменьшается его влажность, а излишки водяных паров оседают в виде инея [1].

В настоящее время для устранения увлажнения обмоток электровозов при отстое на тракционных путях включается обдув ТЭД мотор-вентилятором на низких частотах вращения с возможностью токовой сушки, а при текущем ремонте электровозов в условиях сервисного депо применяют калориферную сушку.

Однако калориферная сушка отрицательно сказывается на изоляционных свойствах обмоток ТЭД: происходят перегрев, тепловое старение, коробление обмоток и др. Кроме того, калориферная сушка требует высоких затрат электроэнергии [2].

Одним из известных методов снижения степени увлажнения изоляции обмоток ТЭД и повышения сопротивления изоляции является электроосмос [3–9]. В [10, 11] предложены устройства и методы обезвоживания изоляции обмоток электрических машин и их влагозащиты, но они применимы для электродвигателей напряжением 0,4 кВ, а также для силовых трансформаторов.

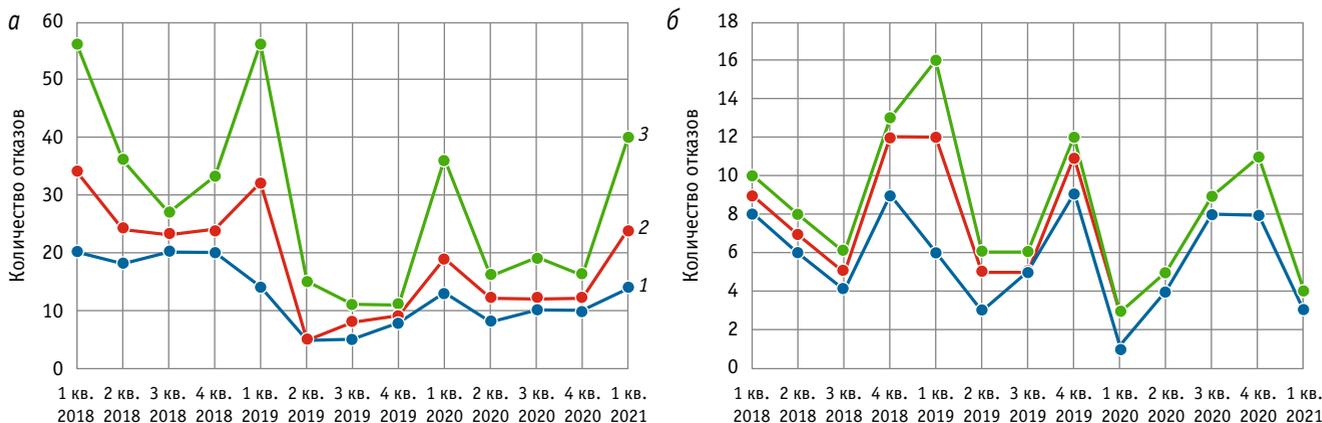


Рис. 1. Диаграмма сезонных повреждений изоляции обмоток ТЭД типа ЭДП-810 (а) и ТЭД типа СТК-810 (б):  
1 — обмотка якоря; 2 — обмотка дополнительного полюса  
и компенсационная обмотка; 3 — обмотка главных полюсов

Цель представленного в статье исследования состояла в проведении испытаний технологии электроосмотической сушки (ЭОС) увлажненной изоляции ТЭД 810-й серии и оценке ее эффективности в условиях сервисного локомотивного депо.

Испытания выполнялись по утвержденной программе, включавшей:

- получение фактических параметров изменения свойств увлажненной изоляции ТЭД на электровозе в результате ЭОС с помощью устройства, разработанного авторами;

- определение рациональных параметров напряжения, подаваемого на изоляцию ТЭД;

- разработку технологии ЭОС увлажненной изоляции обмоток ТЭД в зимний период при ТР-1 электровозов в условиях сервисного депо;

- оценку снижения электропотребления калориферными установками от применения рассматриваемой ЭОС.

Как известно [4], электрокинетическое явление — это физическое явление переноса дисперсной фазы коллоидной системы относительно друг друга под действием приложенного внешнего электрического поля. К этому явлению относятся и электроосмос, открытый Рейссом, а теория электроосмоса разработана Гельмгольцем, Лембом, Перреном и Смолуховским [12].

Для обозначения электрокинетического потенциала в коллоидных дисперсиях используется термин « $\zeta$ -потенциал», который определяет скорость электроосмотического скольжения, т.е. скорость, которую имеет жидкость вдали от поверхности [13]. Величина  $\zeta$ -потенциала для электроосмоса может быть определена по уравнению Гельмгольца — Смолуховского

$$\zeta = \frac{4 \cdot \pi \cdot \eta \cdot \chi \cdot \vartheta}{\varepsilon \cdot I}, \quad (1)$$

где  $\eta$  — вязкость среды, Па·с;

$\chi$  — удельная электропроводность жидкости, См·см<sup>-1</sup>;

$\vartheta$  — кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;

$\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость, Ф/м;

$I$  — сила тока, А.

Для описания электроосмоса рассматриваются электрическая сила и сила трения. Выражение, описывающее постоянную линейную скорость жидкости, или уравнение Гельмгольца — Смолуховского, можно представить в виде [13]

$$u_{Es} = -\frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \zeta}{\eta} \cdot E, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная, равная 8,85·10<sup>-12</sup> Ф/м;

$E$  — напряженность внешнего электрического поля, В/м.

Таким образом, скорость ЭОС прямо пропорциональна напряженности электрического поля. Внешнее электрическое поле создается на основе подводимого постоянного (пульсирующего) напряжения между обмотками и корпусом ТЭД от внешнего источника питания (устройства).

Во время испытаний в качестве источника напряжения ЭОС использовалось устройство, разработанное авторами, внешняя характеристика которого представлена на рис. 2.

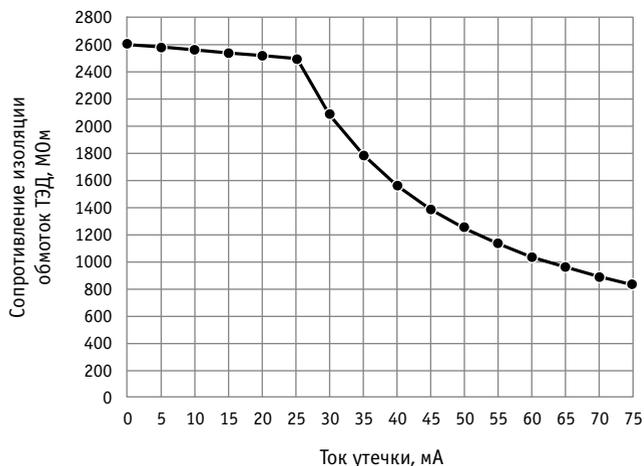


Рис. 2. Внешняя характеристика устройства ЭОС

Для испытания технологии электроосмотической сушки увлажненной изоляции ТЭД 810-й серии между обмотками и корпусом ТЭД подавалось напряжение 2500 В с соблюдением полярности. При таком напряжении штатными приборами измеряются параметры изоляции ТЭД.

Подключение устройства к обмоткам и на корпус ТЭД осуществлялось согласно схеме, представленной на рис. 3. Плюсовая клемма подключалась к проводу 031 силовой схемы электровоза 2ЭС6 (как и штатный прибор для измерения сопротивления изоляции), минусовая клемма — к корпусу ТЭД (корпусу электровоза).

Как показали эксперименты, эффективность ЭОС с пульсирующим напряжением выше, чем с постоянным (сглаженным).

Испытания технологии ЭОС увлажненной изоляции ТЭД выполнялись следующим образом: электровоз с улицы (температура  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) устанавливался на стойло в сервисное депо, подключался к калориферу с регулируемым циклом подачи горячего и холодного воздуха, одновременно включалось устройство ЭОС к одной из четырех групп ТЭД.

Регулирование цикла калориферной сушки осуществлялось в процессе контроля сопротивлений изоляций всех групп ТЭД для совершенствования технологии и параметров сушки на основе сочетания методов калориферной и электроосмотической сушки.

В процессе эксперимента также оценивались фактическое электропотребление калориферными установками и температура подаваемого воздуха в ТЭД.

Всего было испытано 14 электровозов, прежде чем найден режим работы (продолжительность горячего и холодного воздуха) калориферных установок совместно с ЭОС, обеспечивающий заданную скорость изменения сопротивления изоляции ТЭД. При работе калориферной установки только в режиме подачи холодного воздуха электроосмотическая сушка не обеспечивала необходимые значения сопротивления изоляции ТЭД.

График подачи горячего/холодного воздуха, рекомендуемый для комбинированной калориферной и электроосмотической сушки, представлен на рис. 4. За время эксперимента продолжительностью 10 ч горячий воздух подавался в течение 3,5 ч, причем 2 ч — в начале цикла, сразу после 1 ч подачи холодного воздуха.

Для более наглядной оценки изменения сопротивления изоляции ТЭД в табл. 1 приведены значения, снятые каждые 30 мин и характерные для всех выполненных измерений.

Электроосмотическая сушка была подключена к группе ТЭД 3–4 (в схеме силовой электрической цепи два ТЭД включены последовательно, см. рис. 3а) через 1 ч после начала обдува калориферной установкой.

С учетом коэффициента счетчика 100 расход электроэнергии за время испытаний составил 300 кВт·ч. Расход на работу асинхронного привода вентилятора не учитывался, так как в режиме подачи холодного и горячего воздуха он остается без изменений. Скорость нарастания сопротивления изоляции обмоток ТЭД с ЭОС была значительно выше, чем без ЭОС (см. рис. 4).

Необходимо отметить, что представленная технология сушки с заданным циклом подачи горячего и холодного воздуха

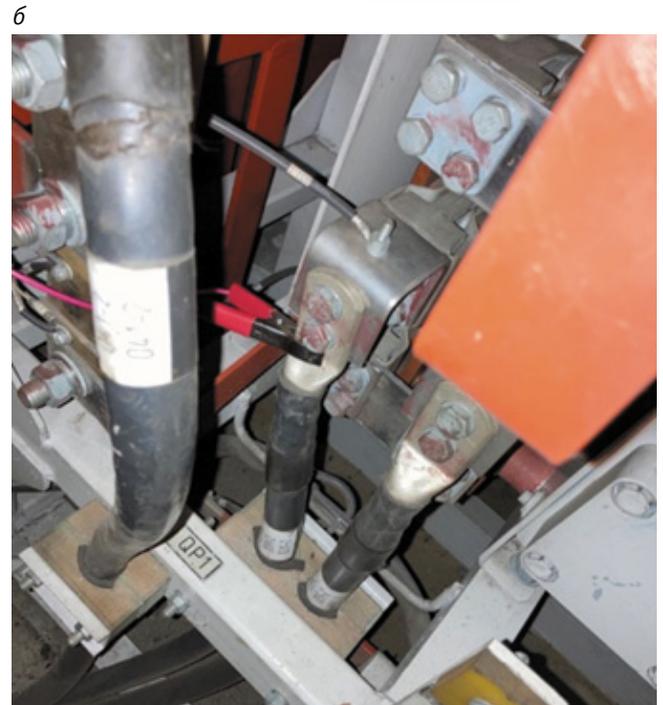
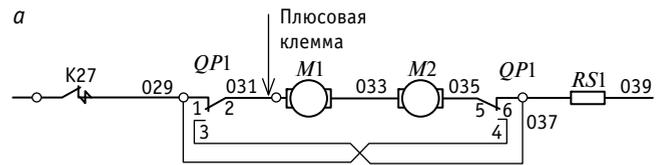


Рис. 3. Место подключения прибора к силовой схеме электровоза 2ЭС6:

K27 — линейный контактор; 029, 031, 033, 035, 037, 039 — номера проводников; QP1 — реверсор; RS1 — шунт; 1–6 — контакторы реверсора

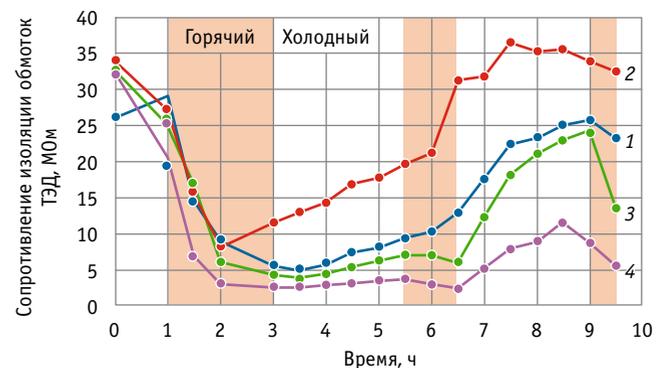


Рис. 4. График сушки ТЭД электровоза 2ЭС6 № 407:

1 — ТЭД 1–2; 2 — ТЭД 3–4 с ЭОС; 3 — ТЭД 5–6; 4 — ТЭД 7–8

удовлетворяет только случаю ЭОС, так как для остальных групп ТЭД изоляция через 9,5 ч оставалась недостаточно высокой.

Стандартный цикл калориферной сушки электровоза за 10 ч расходует 500 кВт·ч электроэнергии. Предлагаемая технология калориферной сушки совместно с ЭОС обеспечивает расход электроэнергии 300 кВт·ч. Кроме того, появляется возмож-

Таблица 1

Значения сопротивления изоляции обмоток групп ТЭД электровоза 2ЭС6 № 407 и показания электросчетчика калориферной установки

Время эксперимента, ч	Показания электросчетчика, кВт·ч*	Измеренное сопротивление изоляции ТЭД по группам, МОм			
		ТЭД 1–2	ТЭД 3–4	ТЭД 5–6	ТЭД 7–8
0	8168,0	26,1	33,8	32,4	32,2
1,0	8168,0	29	27,2	25,2	20,6
1,5	8168,5	14,6	15,6	16,7	7,03
2,0	8168,9	8,9	8,23	6,05	3,1
3,0	8169,5	5,56	11,6	4,38	2,65
3,5	8169,5	4,84	13	3,83	2,66
4,0	8169,5	5,71	14,3	4,52	2,89
4,5	8169,5	7,36	16,8	5,44	3,23
5,0	8169,5	8,08	17,8	6,24	3,45
5,5	8169,5	9,42	19,7	7,07	3,74
6,0	8170,0	10,3	21,1	7,09	3,1
6,5	8170,5	13	31,2	6,02	2,52
7,0	8170,5	17,8	31,7	12,3	5,24
7,5	8170,5	22,4	36,5	18,1	8,02
8,0	8170,5	23,3	35,2	21	8,87
8,5	8170,5	25,1	35,5	22,9	11,7
9,0	8170,5	25,7	33,8	24,2	8,83
9,5	8171,0	23,2	32,4	13,5	5,57

\*Без учета коэффициента счетчика.

ность сократить время сушки с 10 до 8 ч без снижения сопротивления изоляции обмоток ТЭД.

В целом по результатам испытаний электроосмотической сушки увлажненной изоляции коллекторных ТЭД 810-й серии электровозов 2ЭС6 в условиях сервисного локомотивного депо можно сделать следующие выводы.

1. Электроосмотическая сушка увлажненной изоляции обмоток ТЭД неэффективна без работы калорифера.

2. При использовании ЭОС увлажненной изоляции обмоток ТЭД во время калориферной сушки наблюдается существенное увеличение скорости нарастания сопротивления изоляции ТЭД в первые 2–3 ч (сопротивление выше на 20–40 %). Через 10–12 ч указанной сушки по стандартному циклу сопротивление всех групп ТЭД практически выравнивается.

3. Эффективность ЭОС совместно с калориферной сушкой возрастает при подключении к группе ТЭД с сопротивлением обмоток ниже 0,2 МОм.

4. Применение ЭОС позволит снизить расход электроэнергии до 60 % (за счет сокращения времени работы калорифера в режиме нагрева), а также сократить время калориферной сушки до 20 %.

5. Устройство ЭОС целесообразно использовать для ускорения процесса сушки обмоток ТЭД и, как следствие, для снижения расхода электроэнергии и сокращения простоев электровозов в депо.

Дальнейшим развитием исследований авторов станет создание опытного образца устройства проведения ЭОС, который будет иметь небольшие габариты и массу (не более 3 кг). Процесс сушки планируется осуществлять с автоматическим заданием частоты и формы переменной составляющей напряжения в зависимости от значения сопротивления изоляции обмоток. Состояние изоляции будет контролироваться в течение всего процесса сушки, а результаты сохранены на флеш-накопителе.

## Литература

1. Красковская С. Н., Ридель Э. Э., Черепашенец Р. Г. Текущий ремонт и техническое обслуживание электровозов постоянного тока. Москва : Транспорт, 1989. 408 с.
2. Живушко С. В., Калинин К. А., Есиркепов Э. Разработка устройств электроосмотической сушки тяговых электрических машин электроподвижного состава в условиях текущего ремонта // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : материалы VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Омск, 18 ноября 2022 г. Омск : Изд-во ОмГУПС, 2022. С. 67–74.
3. Способ электроосмотической сушки изоляции обмоток электрических машин / Л. М. Филимонов, В. И. Корниенко : авторское свидетельство 1619369 СССР. № 4492640/07 ; заявл. 09.08.1988 ; опубл. 07.01.1991.
4. Способ электроосмотической сушки изоляции обмоток электрических машин / Н. К. Мороз, А. Е. Немировский, К. П. Симаков : патент 2174280 Российская Федерация. № 2000132540/09 ; заявл. 26.12.2000 ; опубл. 27.09.2001, Бюл. № 27.
5. Способ сушки обмоток электрических машин / А. А. Косяков : патент 2255407 Российская Федерация. № 2003133621/11 ; заявл. 18.11.2003 ; опубл. 27.06.2005, Бюл. № 18.
6. Способ электроосмотической сушки изоляции обмоток электрических машин / Н. К. Мороз, А. Е. Немировский, К. П. Симаков : патент 2250550 Российская Федерация. № 2003130425/09 ; заявл. 16.10.2003 ; опубл. 20.04.2005, Бюл. № 11.
7. Способ сушки изоляции электрических машин / Н. Г. Макаренко, С. А. Войчак : патент 2548030 Российская Федерация. № 2013141966/07 ; заявл. 13.09.2013 ; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10.
8. Устройство для электроосмотического способа защиты и диагностирования обмоток погружных электродвигателей / А. А. Трушкин, Р. В. Козичев : патент на полезную модель 201755 Российская Федерация. № 202019951 ; заявл. 10.03.2020 ; опубл. 11.01.2021, Бюл. № 2.
9. Устройство диагностики и сушки изоляции обмоток электрических машин / А. Е. Кузнецов : патент на полезную модель 214523 Российская Федерация. № 2021126492 ; заявл. 08.09.2021 ; опубл. 02.11.2022, Бюл. № 31.
10. Немировский А. Е. Устройство электроосмотической сушки изоляции обмоток электродвигателей 0,4 кВ для экспериментальных исследований // Фёдоровские чтения — 2020: L Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы, Москва, 17–20 ноября 2020 г. Москва : Издательский дом МЭИ, 2020. С. 285–290.
11. Иванов А. В. Электроосмотическая влагозащита электродвигателей // Электропитание. 2010. № 2. С. 63–64. ISSN 2541-8882.
12. Григоров О. Н. Электрокинетические явления. Ленинград : ЛГУ, 1973. 199 с.
13. Russel W. B. Colloidal dispersions. Cambridge : Cambridge University Press, 1991. 517 p.

## References

1. Kraskovskaya S. N., Ridel' E. E., Cherepashenets R. G. Current repair and technical maintenance of DC electric locomotives [Tekushhiy remont i tekhnicheskoe obsluzhivanie elektrovovzov postoyannogo toka]. Moscow : Transport, 1989. 408 p.
2. Zhivushko S. V., Kalin K. A., Esirkepov E. Development of an electroosmotic drying device for traction electric machines of electric rolling stock in the conditions of current repair [Razrabotka ustroystv elektroosmoticheskoy sushki tyagovykh elektricheskikh mashin elektropodvizhnogo sostava v usloviyakh tekushhego remonta] // Operational reliability of the locomotive rolling stock fleet and enhancing the train traction efficiency: materials of the 7th All-Russian scientific and technical conference with international participation, Omsk, November 18, 2022. Omsk : Publishing House of OSTU, 2022. Pp. 67–74.
3. The method of electroosmotic drying of insulation of windings of electric machines [Sposob elektroosmoticheskoy sushki izolyatsii obmotok elektricheskikh mashin] / L. M. Filimonov, V. I. Kornienko : inventor's certificate 1619369 USSR. No. 4492640/07 ; filed 09.08.1988 ; publ. 07.01.1991.
4. The method of electroosmotic drying of insulation of windings of electric machines [Sposob elektroosmoticheskoy sushki izolyatsii obmotok elektricheskikh mashin] / N. K. Moroz, A. E. Nemirovskiy, K. P. Simakov : patent 2174280 Russian Federation. No. 2000132540/09 ; filed 26.12.2000 ; publ. 27.09.2001, Bulletin No. 27.
5. The method of drying windings of electric machines [Sposob sushki obmotok elektricheskikh mashin] / A. A. Kosyakov : patent 2255407 Russian Federation. No. 2003133621/11 ; filed 18.11.2003 ; publ. 27.06.2005, Bulletin No. 18.
6. The method of electroosmotic drying of insulation of windings of electric machines [Sposob elektroosmoticheskoy sushki izolyatsii obmotok elektricheskikh mashin] / N. K. Moroz, A. E. Nemirovskiy, K. P. Simakov : patent 2250550 Russian Federation. No. 2003130425/09 ; filed 16.10.2003 ; publ. 20.04.2005, Bulletin No. 11.
7. The method of drying insulation of electric machines [Sposob sushki izolyatsii elektricheskikh mashin] / N. G. Makarenko, S. A. Voychak : patent 2548030 Russian Federation. No. 2013141966/07 ; filed 13.09.2013 ; publ. 10.04.2015, Bulletin No. 10.
8. A device for electroosmotic method of protection and diagnostics of the windings of submersible electric engines [Ustroystvo dlya elektroosmoticheskogo sposoba zashhity i diagnostirovaniya obmotok pogruzhnykh elektrodvigateley] / A. A. Trushkin, R. V. Kozichev : patent for utility model 201755 Russian Federation. No. 202019951 ; filed 10.03.2020 ; publ. 11.01.2021, Bulletin No. 2.
9. The device for diagnostics and insulation drying of windings of electric machines [Ustroystvo diagnostiki i sushki izolyatsii obmotok elektricheskikh mashin] / A. E. Kuznetsov : patent for utility model 214523 Russian Federation. No. 2021126492 ; filed 08.09.2021 ; publ. 02.11.2022, Bulletin No. 31.
10. Nemirovskiy A. E. The device for electroosmotic insulation drying of 0.4 kV electric engine windings for experimental studies [Ustroystvo elektroosmoticheskoy sushki izolyatsii obmotok elektrodvigateley 0,4 kV dlya eksperimental'nykh issledovaniy] // Fedorov readings — 2020: the 50th International scientific and practical conference with scientific school elements, Moscow, November 17–20, 2020. Moscow : Publishing House of MEI, 2020. Pp. 285–290.
11. Ivanov A. V. Electroosmotic humidity resistance of electric engines [Elektroosmoticheskaya vlagozashhita elektrodvigateley] // Power Supply. 2010. No. 2. Pp. 63–64. ISSN 2541-8882.
12. Grigorov O. N. Electrokinetic phenomena [Elektrokineticheskie yavleniya]. Leningrad : LSU, 1973. 199 p.
13. Russel W. B. Colloidal dispersions. Cambridge : Cambridge University Press, 1991. 517 p.

Объем статьи 0,57 авторских листа

УДК 621.331

Анатолий Александрович Пышкин, кандидат технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения, Екатеринбург, Россия,

Дмитрий Валентинович Лесников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Anatoliy Alexandrovich Pyshkin, PhD in Engineering, Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Dmitriy Valentinovich Lesnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Methodology for determining the correlation function of voltage on the busbars of a DC traction substation

#### Аннотация

Уровень напряжения на шинах выпрямленного тока тяговой подстанции носит случайный характер и зависит от колебания напряжения в первичной энергосистеме и от изменения тока подстанции. Процесс работы электрифицированной железной дороги характеризуется непрерывным изменением расположения, числа и величины нагрузок, которыми определяются токи тяговых подстанций. Многочисленные наблюдения и исследования показали, что напряжение на шинах постоянного тока тяговых подстанций может быть определено только статистико-вероятностными методами с использованием аппарата случайных функций. Поэтому для оценки напряжения на шинах 3,3 кВ в первом приближении можно применить нормальный случайный процесс, обладающий эргодическим свойством, для которого необходимо определение корреляционной функции напряжения.

**Ключевые слова:** случайный процесс, колебания напряжения, математическое ожидание, корреляционная функция, интервал в пакете, вероятность появления межпоездного интервала, подстанционная зона, ток поезда, определенный интеграл.

#### Abstract

The voltage level on the rectified current busbars of a traction substation is random and depends on voltage fluctuations in the primary power system and the substation current. The operation process of an electrified railway is characterized by a continuous change in the location, number and magnitude of loads which determine the currents of traction substations. Numerous observations and studies have shown that the voltage on the DC busbars of traction substations could be estimated only on the basis of statistical probabilistic methods using the apparatus of random functions. Therefore, to estimate the voltage on 3.3 kV busbars in the first approximation, a normal random process with an ergodic property could be applied, for which it is necessary to determine the voltage correlation function.

**Keywords:** random process, voltage fluctuations, mathematical expectation, correlation function, interval package, probability of inter-train interval occurrence, substation area, train current, definite integral.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-97-100

Для оценки характеристик нормального стационарного случайного процесса, который описывает колебания напряжения на шинах постоянного тока тяговых подстанций [1, 2], следует найти его математическое ожидание и корреляционную функцию, определяющую значение момента связи любых двух ординат случайных функций, взятых в произвольные моменты времени.

Вычисление корреляционной функции в самом общем случае — чрезвычайно сложная задача, так как напряжение на тяговых подстанциях зависит от множества случайных факторов. Поэтому целесообразно упростить построение математической модели рассматриваемого процесса.

Естественно, что при налагаемых ограничениях процесс, исследуемый в модели, не должен существенно отличаться от реального.

Предположим, что последовательность возникновения различного напряжения на шинах тяговых подстанций находится в прямой зависимости от последовательности пропуска поездов по исследуемому участку [3]. Напряжение на шинах 3,3 кВ можно рассматривать равным напряжению холостого хода. В первом приближении будем считать его неизменным ввиду неограниченной мощности питающей сети энергосистемы за вычетом потерь напряжения на подстанции от случайно расположенных на подстанционной зоне нагрузок.

При принятых допущениях модель рассматриваемого процесса аналогична математической модели, предложенной профессором Г. Г. Марквардом для определения корреляционной функции тока фидера [4].

Обозначим потерю напряжения на подстанции в момент времени  $x$  от тока поезда  $g$  через  $\Delta U(x)$ , а в момент времени  $x + \tau$  от тока того же поезда — через  $\Delta U(x + \tau)$ . Считая потери напряжения на подстанции от нагрузок на разных путях независимыми, корреляционную функцию напряжения для одного пути определим по следующим выражениям [4, 5]:

$$K(\tau) = \frac{1}{\bar{\Theta}} \left[ b_1 + 2 \sum_{k=1}^{K_M} b_k \right]; \quad (1)$$

$$\bar{\Theta} = \frac{T}{N}; \quad (2)$$

$$b_1 = \sum_{g=1}^V \frac{N_g}{N} \int_{(T)} \Delta U(x) \cdot \Delta U(x + \tau) dx; \quad (3)$$

$$b_k = \int_{\Theta_{k \min}}^{\Theta_{k \max}} P(\Theta_k) d\Theta_k \cdot \int_{(T)} \Delta U(x) \Delta U(x + \tau - \Theta_k) dx, \quad (4)$$

где  $N_g$  — число поездов типа  $g$  за период  $T$ ;

$N$  — размеры движения на рассматриваемом участке, группирующиеся из  $V$  типов;

$\Theta_{k \min}, \Theta_{k \max}$  — соответственно минимальный и максимальный фактические интервалы движения, мин;

$\bar{\Theta}$  — математическое ожидание интервала между поездами, мин;

$P(\Theta_k)$  — вероятность появления межпоездного интервала  $\Theta_k$ ;

$\Delta U(x), \Delta U(x + \tau - \Theta_k)$  — потери напряжения на подстанции в момент времени  $x$  и  $x + \tau - \Theta_k$  от средневзвешенного тока поезда  $I$  на подстанционной зоне, В.

Средневзвешенный ток поезда нетрудно определить, если умножить средние токи поездов различных типов на соответствующие вероятности появления их на участке и далее просуммировать по всем типам поездов.

Для случая, когда средний ток поезда типа  $g$  на обеих межподстанционных зонах одинаков и равен  $I_g$ , необходимо рассмотреть выражение (2). При этом примем допущение о том, что время хода по межподстанционной зоне  $t_{gis}$  равно половине времени хода по подстанционной зоне  $t_g$ , а скорость движения поездов постоянна по всей длине подстанционной зоны. Тогда потерю напряжения на подстанции от тока поезда  $I_g$  за время хода по подстанционной зоне при двустороннем питании можно представить в виде диаграммы, показанной на рис. 1 (диаграмма построена для условия, что уравнивающий ток между подстанциями отсутствует).

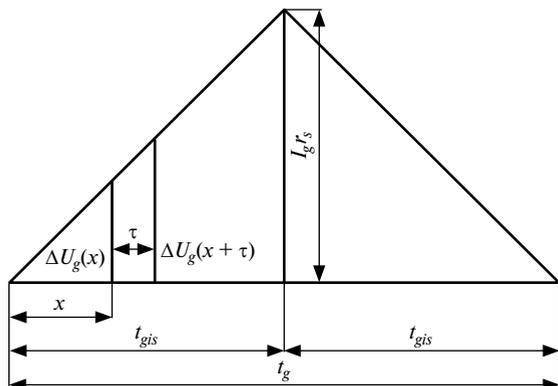


Рис. 1. Диаграмма потерь напряжения на тяговой подстанции при двустороннем питании межподстанционных зон

При интервале корреляции, меньшем времени хода поезда по межподстанционной зоне, представленной на рис. 1, будем иметь следующие значения  $\Delta U(x)$  и  $\Delta U(x + \tau)$ :

1) если  $0 \leq x \leq t_{gis} - \tau$ , то

$$\begin{cases} \Delta U(x) = I_g r_s \cdot \frac{x}{t_{gis}}; \\ \Delta U(x + \tau) = I_g r_s \cdot \frac{x + \tau}{t_{gis}}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $I_g r_s$  — максимум потерь напряжения на тяговой подстанции от тока поезда типа  $g$ , В;

$r_s$  — эквивалентное сопротивление тяговой подстанции, принимаемое постоянным, Ом;

2) если  $t_{gis} - \tau \leq x \leq t_{gis}$ , то

$$\begin{cases} \Delta U(x) = I_g r_s \cdot \frac{x}{t_{gis}}; \\ \Delta U(x + \tau) = I_g r_s \cdot \frac{2t_{gis} - x - \tau}{t_{gis}}, \end{cases} \quad (6)$$

3) если  $t_{gis} \leq x \leq t_{gis} - \tau$ , то

$$\begin{cases} \Delta U(x) = I_g r_s \cdot \frac{2t_{gis} - x}{t_{gis}}; \\ \Delta U(x + \tau) = I_g r_s \cdot \frac{2t_{gis} - x - \tau}{t_{gis}}. \end{cases} \quad (7)$$

Тогда значение интеграла, входящего в выражение (2), при интегрировании в пределах от 0 до  $t_g - \tau$  найдем следующим образом:

$$\begin{aligned} \int_0^{t_g - \tau} \Delta U(x) \Delta U(x + \tau) dx &= \frac{I_g^2 r_s^2}{t_{gis}^2} \left[ \int_0^{t_g - \tau} x(x + \tau) dx + \right. \\ &+ \left. \int_{t_{gis} - \tau}^{t_{gis}} x(2t_{gis} - x - \tau) dx + \int_{t_{gis}}^{t_g - \tau} (2t_{gis} - x)(2t_{gis} - x - \tau) dx \right] = \\ &= I_g^2 r_s^2 \left( \frac{2}{3} t_{gis} - \frac{\tau^2}{t_{gis}} + \frac{\tau^3}{2t_{gis}^2} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

При  $\tau < t_{gis}$  выражение (2) примет вид

$$b_1 = r_s^2 \sum_{g=1}^V P_g I_g^2 \left( \frac{2}{3} t_{gis} - \frac{\tau^2}{t_{gis}} + \frac{\tau^3}{2t_{gis}^2} \right). \quad (9)$$



При  $t \geq t_{gis}$   $x$  изменяется также в пределах от 0 до  $t_g - \tau$ . Тогда:

$$\begin{cases} \Delta U(x) = I_g r_s \cdot \frac{x}{t_{gis}}; \\ \Delta U(x + \tau) = I_g r_s \cdot \frac{2t_{gis} - x - \tau}{t_{gis}}; \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \int_0^{t_g - \tau} \Delta U(x) \Delta U(x + \tau) dx &= \frac{I_g^2 r_s^2}{t_{gis}^2} \int_0^{t_g - \tau} x(2t_{gis} - x - \tau) dx = \\ &= I_g^2 r_s^2 \left( \frac{4}{3} t_{gis} - 2\tau + \frac{\tau^2}{t_{gis}} - \frac{\tau^3}{6t_{gis}^2} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

При  $\tau \geq t_{gis}$  выражение (2) примет вид

$$b_1 = r_s^2 \sum_{g=1}^V P_g I_g^2 \left( \frac{4}{3} t_{gis} - 2\tau + \frac{\tau^2}{t_{gis}} - \frac{\tau^3}{6t_{gis}^2} \right). \quad (12)$$

Таким образом, выражения (9) и (12) учитывают разнотипность поездов, проходящих по рассматриваемой подстанционной зоне, и являются неслучайными функциями времени.

Аналогично рассмотрим внутренний интеграл выражения (4), которое отображает второй начальный момент потерь напряжения на подстанции от токов поездов, находящихся на подстанционной зоне в момент времени  $x$  и  $x + \tau$ , не совпадающих с типом  $g$ .

Пусть  $\tau - \Theta_k = \delta$ . При  $\delta \leq 0$  и  $|\delta| \leq t_{is}$   $x$  изменяется в пределах  $\delta < x < t_g$  и из рис. 1 имеем:

1) при  $\delta \leq x \leq t_{is}$

$$\begin{cases} \Delta U(x) = I_r s \cdot \frac{x}{t_{is}}; \\ \Delta U(x - \delta) = I_r s \cdot \frac{x - \delta}{t_{is}}; \end{cases} \quad (13)$$

2) при  $t_{is} \leq x \leq t_{is} + \delta$

$$\begin{cases} \Delta U(x) = I_r s \cdot \frac{2t_{is} - x}{t_{is}}; \\ \Delta U(x - \delta) = I_r s \cdot \frac{x - \delta}{t_{is}}; \end{cases} \quad (14)$$

3) при  $t_{is} + \delta \leq x < t_g$

$$\begin{cases} \Delta U(x) = I_r s \cdot \frac{2t_{is} - x}{t_{is}}; \\ \Delta U(x - \delta) = I_r s \cdot \frac{2t_{is} - x + \delta}{t_{is}}. \end{cases} \quad (15)$$

Тогда исходя из (13)–(14) внутренний интеграл

$$\begin{aligned} \int_0^{t_g} \Delta U(x) \Delta U(x - \delta) dx &= \frac{I^2 r_s^2}{t_{is}^2} \left[ \int_{\delta}^{t_{is}} x(x - \delta) dx + \right. \\ &+ \left. \int_{t_{is}}^{t_{is} + \delta} (x - \delta)(2t_{is} - x) dx + \int_{t_{is} + \delta}^{t_g} (2t_{is} - x)(2t_{is} - x + \delta) dx \right] = \\ &= I^2 r_s^2 \left( \frac{2}{3} t_{is} - \frac{\delta^2}{t_{is}} + \frac{\delta^3}{2t_{is}^2} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

При  $\delta < 0$  и  $|\delta| \geq t_{gis}$

$$\begin{cases} \Delta U(x) = I_r s \cdot \frac{2t_{is} - x}{t_{is}}; \\ \Delta U(x - \delta) = I_r s \cdot \frac{x - \delta}{t_{is}}; \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \int_{\delta}^{t_g} \Delta U(x) \Delta U(x - \delta) dx &= \frac{I^2 r_s^2}{t_{is}^2} \int_{\delta}^{t_{is}} x(2t_{is} - x)(x - \delta) dx = \\ &= I^2 r_s^2 \left( \frac{4}{3} t_{is} - 2\delta + \frac{\delta^2}{t_{is}} - \frac{\delta^3}{6t_{is}^2} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

При  $\delta \geq 0$  и  $\delta \leq t_{is}$   $x$  изменяется в пределах от 0 до  $t_g - \delta$ . Тогда аналогично (9) получим

$$\begin{aligned} \int_0^{t_g - \delta} \Delta U(x) \Delta U(x + \delta) dx &= \frac{I^2 r_s^2}{t_{is}^2} \left[ \int_0^{t_{is} - \delta} x(x + \delta) dx + \right. \\ &+ \left. \int_{t_{is} - \delta}^{t_{is}} x(2t_{is} - x - \delta) dx + \int_{t_{is}}^{t_g - \delta} (2t_{is} - x)(2t_{is} - x - \delta) dx \right] = \\ &= I^2 r_s^2 \left( \frac{2}{3} t_{is} - \frac{\delta^2}{t_{is}} + \frac{\delta^3}{2t_{is}^2} \right). \end{aligned} \quad (19)$$

При  $\delta > 0$  и  $\delta \geq t_{is}$ :

$$\begin{aligned} \int_0^{t_g - \delta} \Delta U(x) \Delta U(x + \delta) dx &= \frac{I^2 r_s^2}{t_{is}^2} \int_{t_{is}}^{t_g - \delta} x(2t_{is} - x - \delta) dx = \\ &= I^2 r_s^2 \left( \frac{4}{3} t_{is} - 2\delta + \frac{\delta^2}{t_{is}} - \frac{\delta^3}{6t_{is}^2} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

Как и следовало ожидать, выражения (16) и (19), а также (18) и (20) получились одинаковыми.

Раскроем внешний интеграл выражения (3).

Исходя из закона распределения межпоездного интервала, полученного профессором К. Г. Марквардтом [1] на основе биномиального распределения числа поездов, запишем

$$\int_{\Theta_{k \min}}^{\Theta_{k \max}} P(\Theta_k) d\Theta_k = \sum_{\Theta}^{n\Theta} Pq \Theta^{\tau-1}, \quad (21)$$

где  $\tau$  — межпоездной интервал, мин;

$\Theta$ ,  $n\Theta$  — соответственно минимальный и максимальный фактический интервал движения поездов, мин;

$P$  — вероятность того, что нитка графика движения окажется занятой;

$q$  — вероятность события, противоположного предыдущему. Тогда выражение (3) для  $|\delta| \leq t_{is}$  примет вид

$$b_k = I^2 r_s^2 \sum_{\Theta}^{n\Theta} Pq \Theta^{\tau-1} \left( \frac{2}{3} t_{is} - \frac{\delta^2}{t_{is}} + \frac{\delta^3}{2t_{is}^2} \right). \quad (22)$$

При  $|\delta| \geq t_{is}$

$$b_k = I^2 r_s^2 \sum_{\Theta}^{n\Theta} Pq \Theta^{\tau-1} \left( \frac{4}{3} t_{is} - 2\delta + \frac{\delta^2}{t_{is}} - \frac{\delta^3}{6t_{is}^2} \right). \quad (23)$$

Таким образом, подставляя выражения (9), (12), (22) и (23) в (1), определяем второй начальный момент для различных интервалов корреляции для каждого пути подстанционной зоны. Считая нагрузку на соседних путях, отнесенную к рассматриваемой подстанции, величинами независимыми и используя выражение (1), определяем корреляционную функцию напряжения для многопутного участка.

На рис. 2 в виде кривых показаны результаты расчетов по вышеуказанным формулам соответственно для различных поездных токов. В расчет заложены следующие данные:  $I_g = I$ ,  $t_{gis} = t_{is} = 24$  мин,  $r_s = 0,0617$  Ом,  $\Theta = 8$  мин,  $N = 112$  поездов.

Как видно из рис. 2, функция корреляции напряжения имеет экспоненциальный закон и практически затухает при

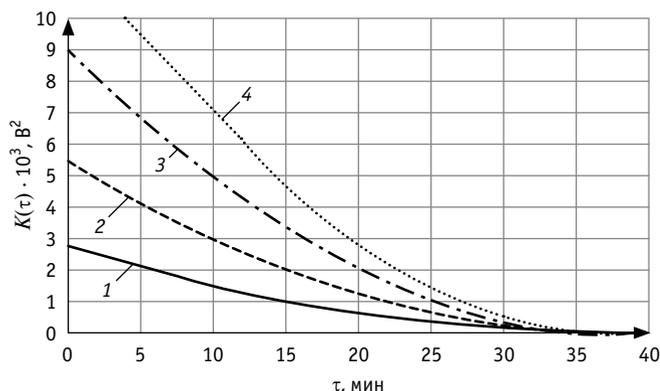


Рис. 2. Диаграмма зависимости корреляционных функций напряжения от величины межпоездного интервала для различных значений средневзвешенного тока поезда: 1 —  $I = 500$  А; 2 —  $I = 700$  А; 3 —  $I = 900$  А; 4 —  $I = 1000$  А

интервале корреляции, равном времени хода поезда по подстанционной зоне, а ее ординаты увеличиваются с возрастанием среднего поездного тока.

Таким образом, исследование корреляционной функции напряжения на шинах 3,3 кВ, найденной на основе эмпирических данных, позволило сделать вывод, что корреляционная функция, полученная в результате аналитических расчетов, имеет тот же характер, что и эмпирическая функция корреляции.

Различие между ними (эмпирическая кривая затухает быстрее, чем аналитическая) объясняется в основном тем, что в расчетах не учтено колебание напряжения в первичной энергосистеме, а действительная кривая поездного тока заменена усредненной за время хода по подстанционной зоне. Безусловно, для описания уровня напряжения на шинах выпрямленного тока желательно применять четырехпараметрический закон распределения, например Пирсона IV типа.

## Литература

1. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. Москва : Транспорт, 1982. 528 с.
2. Тер-Оганов Э. В., Пышкин А. А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. 432 с.
3. Марквардт Г. Г. Применение теории вероятностей и вычислительной техники в системе электроснабжения. Москва : Транспорт, 1972. 224 с.
4. Марквардт Г. Г. Корреляционная функция тока фидера // Труды МИИТ. 1970. Вып. 340.
5. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва : Высшая школа, 1972. 368 с.

## References

1. Markvardt K. G. Power supply of electrified railways [Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog]. Moscow : Transport, 1982. 528 p.
2. Ter-Oganov E. V., Pyshkin A. A. Power supply of railways [Elektrosnabzhenie zheleznnykh dorog]. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2014. 432 p.
3. Markvardt G. G. Application of probability theory and computer technology in a power supply system [Primenenie teorii veroyatnostey i vychislitel'noy tekhniki v sisteme elektrosnabzheniya]. Moscow : Transport, 1972. 224 p.
4. Markvardt G. G. Correlation function of the feeder current [Korrelyatsionnaya funktsiya toka fidera] // Proceedings of MIIT. 1970. Issue 340.
5. Gmurman V. E. Probability theory and mathematical statistics [Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika]. Moscow : Higher School, 1972. 368 p.

Объем статьи 0,32 авторских листа

УДК 621.336.2

Валерий Викторович Томилов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Олег Алексеевич Сидоров, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,

Сандугаш Мырзабековна Утепбергенова, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Энергетика» Акционерного общества «Академия логистики и транспорта» (АО «АЛТ»), Алматы, Республика Казахстан

## ВЛИЯНИЕ УВЕЛИЧЕННОГО ЗИГЗАГА КОНТАКТНОГО ПРОВОДА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ НАГРЕВА ПОЛОЗА ТОКОПРИЕМНИКА МАГИСТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Valeriy Viktorovich Tomilov, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Oleg Alexeevich Sidorov, DSc in Engineering, Professor, Electric Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,

Sandugash Myrzabekovna Utepbergenova, PhD in Engineering, Senior Lecturer, Power Engineering Department, Academy of logistics and transport (ALT), Almaty, Republic of Kazakhstan

## The impact of the enhanced zigzag of a contact wire on distribution of the heating power of a pantograph slide of the main electric rolling stock

### Аннотация

Цель исследования, представленного в статье, — совершенствование математической модели расчета потерь мощности в полозе токоприемника, в частности учет увеличенных значений зигзага контактного провода при движении электроподвижного состава. Предмет исследования — полоз токоприемника. В статье приведен пример расчета полоза токоприемника, оснащенного угольными вставками, показывающий, что нагрев всей конструкции полоза осуществляется сильнее, когда контактный провод находится в крайнем положении увеличенного зигзага, при этом распределение нагрева вдоль полоза неравномерно и наибольшая мощность резистивного нагрева наблюдается над шунтами. Полученные результаты распределения мощности нагрева полоза позволяют дополнить комплексную модель теплового состояния токоприемника, разработанную в Омском государственном университете путей сообщения. Универсальность модели дает возможность исследовать различные зигзаги контактного провода и оценивать его влияние на распределение тягового тока по полозу в зависимости от мест установки шунтов и их количества.

**Ключевые слова:** токоприемник, полоз, тяговый ток, моделирование, электроподвижной состав, мощность, сопротивление, шунт, зигзаг.

### Abstract

The objective of the study presented in the article is to improve the mathematical model for calculating power losses in a pantograph slide, in particular, taking into consideration the enhanced values of a contact wire zigzag during the motion of an electric rolling stock. The subject of the study is a pantograph slide. The article provides an example for calculating the slide of a pantograph equipped with carbon inserts, illustrating that the heating of the entire structure of the slide is performed stronger when a contact wire is in the extreme position of the enhanced zigzag, while the distribution of heating along the slide is uneven and the greatest power of resistive heating is observed over the shunts. The obtained results of heating power distribution of the slide allow us to supplement the complex model of a thermal state of the pantograph developed at Omsk State Transport University. The versatility of the model allows to investigate various zigzags of the contact wire and to assess the impact on distribution of traction current along the slide, depending on the installation locations of shunts and their quantity.

**Keywords:** current collector, slide, traction current, modelling, electric rolling stock, power, resistance, shunt, zigzag.

Токоприемник, одновременно являющийся элементом электровоза и системы токосъема, должен обеспечивать бесперебойное питание потребителей электрической энергии подвижного состава. Типовая конструкция вертикальной контактной подвески, взаимодействующей со вставками полоза токоприемника, обуславливает геометрию перемещения сильноточного контакта в виде зигзага. Значительные потери электрической энергии в полозе — одна из причин сокращения срока службы его токосъемных элементов и каркаса в результате нагрева и разупрочнения материалов. Передача тягового тока от полоза к системе подвижных рам токоприемника осуществляется при помощи гибких шунтов, места установки и способы крепления которых на различных токоприемниках отличаются.

С точки зрения электротехники наиболее короткий путь протекания тока по полозу от точки контакта к шунту дает меньше электрических потерь в его конструкции, т.е. чем больше распределенных электрических соединений от верхнего узла к системе подвижных рам, тем

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-101-107

потерь меньше. Однако подрессоренный ползог ограничен собственной массой и частью массы шунтов таким образом, что невозможно иметь их большое число. Типовое решение заключается в установке шунтов в двух точках (иногда попарно), разнесенных на равное расстояние от оси токоприемника. Например, для отечественных каркасных ползозов места установки шунтов предусмотрены вблизи кареток с расстоянием друг от друга примерно 1000 мм. Однако зигзаг у типовой контактной подвески на прямом участке пути составляет  $\pm 300$  мм. При этом путь протекания тягового тока по ползозу (транзитного тока) и соответственно электрические потери значительны. В таком случае целесообразно было бы сократить расстояние между шунтами до 600 мм.

Фактическая ширина зигзага контактной подвески на участках железных дорог — показатель непостоянный [1]. Нормативный документ [2] устанавливает допуски по ее предельной величине, кроме того, нарушения в эксплуатации приводят к увеличению зигзага таким образом, что контактный провод оказывается значительно дальше шунта (на роге токоприемника) без потери передачи электрической энергии.

Изучение влияния положения контактного провода вдоль ползоза позволит более точно оценить его тепловое состояние, электрические потери, дать рекомендации по местам установки шунтов и рассмотреть дополнительные пути увеличения нагрузочной способности токоприемников [3, 4].

Анализ результатов моделирования токораспределения, выполненного учеными ВНИИЖТ [5] и УрГУПС [6], показывает, что положение контактного провода влияет на величину общей тепловой мощности и сопротивления верхнего узла. Математическая модель, разработанная в ОмГУПС [7], содержит функцию распределения тепловой мощности ползоза, однако, как и вышеуказанные модели, не учитывает крайние положения контактного провода (дальше мест установки шунтов). Результаты моделирования [5–7] показывают, что наибольшие потери электроэнергии возникают, когда контактный провод расположен в середине ползоза, но какова их величина при

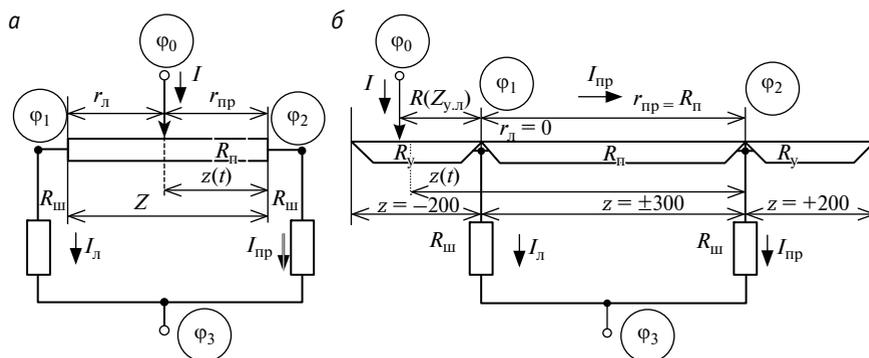


Рис. 1. Расчетные схемы замещения ползоза токоприемника при положении контактного провода между шунтами [7] (а) и при увеличенном зигзаге (б)

сверхнормативных положениях зигзага, модели ответа не дают.

Отклонение зигзага контактного провода от оси токоприемника далее мест расположения шунтов ползоза будем называть в статье увеличением зигзага, а его значения — увеличенными.

Для исследования примем наименьшее известное расстояние между местами крепления шунтов ползоза 600 мм (или  $\pm 300$  мм относительно оси токоприемника) за расчетную величину. Таким достаточно узким расстоянием крепления шунтов ( $\pm 280$  мм) по сравнению с отечественными каркасными отличаются евроползозы (например, конструкции Pantrack RH 85 M8 токоприемника постоянного АХ 023 BUILT для грузового электровоза [8]).

Расчетные схемы усовершенствованной математической модели [7] определения резистивной мощности ползоза представлены на рис. 1. Расчет выполнен при следующих основных допущениях: 1) сопротивление ползоза  $R_{\text{п}}$  — однородное вдоль конструкции ползоза, приведенное и включает сопротивления его элементов — каркаса, вставки и токопроводящего клея между ними; 2) не учитываются сопротивления болтовых и сварных соединений шунтов; 3) не учитывается сопротивление силовоточного контакта «вставка — провод». Научная новизна заключается в определении характера мощности нагрева тяговым током участков ползоза при увеличенных значениях зигзага.

Значение тепловой мощности при протекании тягового тока между шунтами (рис. 1а) определяется суммой параллельных сопротивлений левого и правого плеч [7], Ом:

$$R(Z_{\pm 300}) = 1/[1/R(z_{\text{л}}) + 1/R(z_{\text{пр}})]. \quad (1)$$

При увеличенном зигзаге (рис. 1б) необходимо дополнительно учитывать участок ползоза за местом установки шунта:

$$R(Z) = 1/[1/R_{\text{ш}} + 1/(R_{\text{п}} + R_{\text{ш}})] + R(Z_{y,i}). \quad (2)$$

Сопротивления в расчетной схеме (см. рис. 1а) для протекания токов между левым  $I_{\text{л}}$  и правым  $I_{\text{пр}}$  шунтами определяются следующими формулами, Ом:

$$R(z_{\text{л}}) = r_{\text{л}}(z) + R_{\text{ш}}; \quad (3)$$

$$R(z_{\text{пр}}) = r_{\text{пр}}(z) + R_{\text{ш}}. \quad (4)$$

Изменяющиеся сопротивления левого  $r_{\text{л}}(z)$  и правого  $r_{\text{пр}}(z)$  плеч для различного положения зигзага  $z(t)$  и условия  $Z = \pm 300$  мм, соответствующего полному сопротивлению участка ползоза между шунтами  $R_{\text{п}}$ , Ом:

$$r_{\text{л}}(z) = R_{\text{п}} \cdot z(t)/Z; \quad (5)$$

$$r_{\text{пр}}(z) = R_{\text{п}} \cdot [Z - z(t)]/Z. \quad (6)$$

Тогда выражения (5) и (6) с учетом (3) и (4) примут вид, Ом:

$$R(z_{\text{л}}) = R_{\text{п}} \cdot z(t)/Z + R_{\text{ш}}; \quad (7)$$

$$R(z_{\text{пр}}) = R_{\text{п}}[Z - z(t)]/Z + R_{\text{ш}}. \quad (8)$$

Сопротивление участка ползоза за местом установки  $i$ -го шунта  $R(Z_{y,i})$  также зависит от положения провода  $z(t)$  и определяется пропорционально расстоянию

янию от точки контакта до места установки шунта. При этом сопротивление плеча  $r_{л}$  или  $r_{пр}$  отнесенного к соответствующему шунту, равно нулю. Например, на рис. 1б  $r_{л} = 0$  для положения контакта слева, а сопротивление  $r_{пр} = R_{п}$  — максимально.

Сопротивление полоза  $R_{п}$  для протекающего тягового тока  $I$  между шунтами определяется суммой его двух частей: левого плеча  $r_{л}$  и правого  $r_{пр}$  [9]:

$$R_{п} = r_{л} + r_{пр}. \quad (9)$$

Токи левого и правого плеч (шунтов) перераспределяются обратно пропорционально их сопротивлению [7] и по первому закону Кирхгофа, А:

$$I = I_{л} + I_{пр}. \quad (10)$$

Зависимость собственного сопротивления полоза относительно контактной вставки показана на рис. 2. Значения физических величин, определяющих характеристику полоза токоприемника, при которых выполнен расчет, следующие:  $I = 1600$  А,  $R_{п}(600 \text{ мм}) = 40$  мкОм,  $R_{ш} = 60$  мкОм; вертикальная подвеска представлена функцией ломаной с зигзагом  $Z = \pm 500$  мм.

Ток левого и правого плеч (рис. 3) при расположении точки контакта между шунтами:

$$I_{л} = I / [R(z_{л}) / R(z_{пр}) - 1]; \quad (11)$$

$$I_{пр} = I / [R(z_{пр}) / R(z_{л}) - 1]. \quad (12)$$

Распределение тока по плечам полоза в пределах рабочей зоны  $\pm 300$  мм изменяется так же, как и в модели, рассмотренной в [7], а за пределами рабочей зоны ток постоянный, как показано на рис. 3.

Мощность резистивного нагрева полоза в границах  $\pm 300$  мм и его шунтов (рис. 4) от протекания токов левого и правого плеч определяется соответственно [7] следующим образом, Ом:

$$P(Z_{л}) = I_{л}^2 \cdot R(Z_{л}); \quad (13)$$

$$P(Z_{пр}) = I_{пр}^2 \cdot R(Z_{пр}). \quad (14)$$

При увеличенных зигзагах  $P(Z_{л})$  и  $P(Z_{пр})$  постоянны, так как изменение величин тока плеч отсутствует, а их значения обусловлены сопротивлением шунтов  $R_{ш}$  и сопротивлением полоза  $R_{п}$  на участках  $\pm 300$  мм.

Дополнительно мощность резистивного нагрева от протекания тока по участкам полоза при увеличенном зигзаге определяется следующим образом, Ом:

$$P(Z_{y,л}) = R(Z_{y,л}) \cdot I^2; \quad (15)$$

$$P(Z_{y,пр}) = R(Z_{y,пр}) \cdot I^2. \quad (16)$$

Общая мощность нагрева, Вт:

$$P(Z) = P(Z_{л}) + P(Z_{пр}) + P(Z_{y,л}) + P(Z_{y,пр}). \quad (17)$$

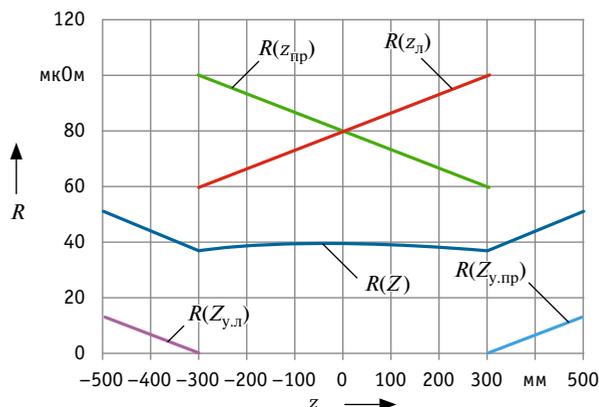


Рис. 2. График собственного сопротивления полоза относительно контактной вставки

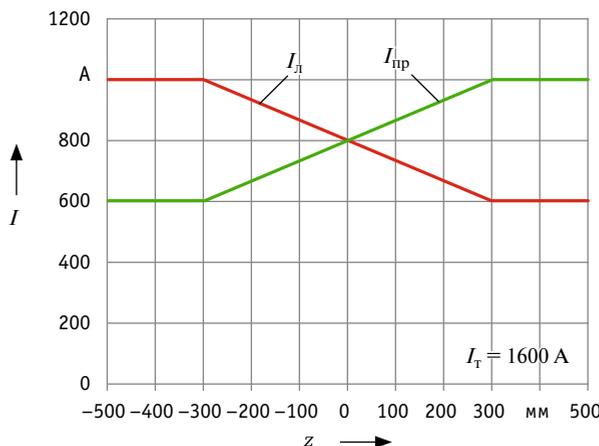


Рис. 3. Расчетные значения тока шунтов полоза

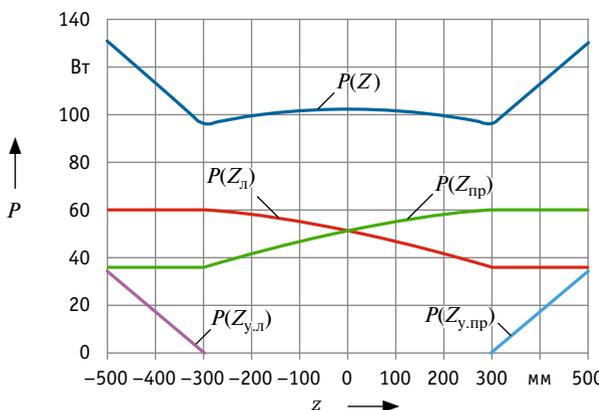


Рис. 4. График распределения мощности резистивного нагрева полоза от собственного сопротивления с шунтами

Согласно рис. 4, максимальная величина мощности резистивного нагрева полоза  $P(Z)$  от сопротивления полоза  $R(Z)$  с учетом сопротивлений его шунтов (см. рис. 2) наблюдается при крайних положениях контактного провода на полозе при  $z = \pm 500$  мм, минимальная — над местами установки шунтов.

При увеличенных зигзагах контактного провода через участки полоза протекает полная величина тягового тока  $I$ , которая учитывается при расчете мощности резистивного нагрева квадратичной зависимостью. В границах  $\pm 300$  мм тяговый ток делится между шунтами, и мощность от его протекания по полозу значительно меньше (рис. 4 и 5).

Характер нагрева шунтов от положения провода за пределами зигзага  $\pm 300$  мм не меняется, что иллюстрирует рис. 6. Объяснение этому достаточно простое: ток в шунтах при увеличенном зигзаге не перераспределяется.

Максимальная резистивная мощность нагрева шунтов наблюдается при увеличенном зигзаге вне зависимости от положения контактного провода в точках крепления шунтов и за их пределы.

Распределение суммарной резистивной мощности нагрева полоза в пролете (например, длиной 60 м) показано на рис. 7. Необходимо отметить, что такое распределение справедливо исключительно для представления положения контактного провода в виде ломаной функции.

При увеличенном зигзаге нагрев полоза существенно выше, чем на участке между шунтами, причем чем больше отклонение зигзага, тем сильнее нагрев.

Функция потерь резистивной мощности в полозе  $P(z; I)$  при известных величинах тока плеч  $I_{\text{л}}$  и  $I_{\text{пр}}$  с учетом расчетной величины его элемента  $Z_i = 30$  мм [10],  $i = 600/30 = 20$  шт., определяется сопротивлением  $R_i = 40/20 = 2$  мкОм:

$$P(z; I) = P_{\text{л}}(z; I) + P_{\text{пр}}(z; I) + P_{\text{ш}}(z; I), \quad (18)$$

где  $P_{\text{л}}(z; I)$ ,  $P_{\text{пр}}(z; I)$  — мощность потерь вдоль полоза от тока левого и правого плеч соответственно, Вт:

$$P_{\text{л}}(z; I) = I_{\text{л}}^2 \cdot R_i; \quad (19)$$

$$P_{\text{пр}}(z; I) = I_{\text{пр}}^2 \cdot R_i; \quad (20)$$

$P_{\text{ш}}(z; I)$  — мощность потерь между шунтами и за шунтами при увеличенном зигзаге, Вт:

$$P_{\text{ш}}(z; I) = I^2 \cdot R_i. \quad (21)$$

Матрица распределения резистивной мощности нагрева  $P(z; I)$  вдоль полоза в одном пролете контактной сети длиной 60 м приведена в табл. 1. Значения мощности в диапазоне  $\pm 300$  мм являются результатом потерь сопротивления полоза и его шунтов токами советующих плеч. В диапазонах от  $-500$  до  $-300$  мм и от  $300$  до  $500$  мм, соответствующих увеличенному зигзагу, представлены значения мощности нагрева суммарным тяговым током.

Распределение потерь резистивной мощности полоза от протекания тягового тока по его элементам за пролет контактной сети показано на рис. 8.

Электрические потери в полозе наибольшие при максимальных значениях увеличенного зигзага (см. рис. 7), однако суммарный резистивный нагрев сильнее всего наблюдается в точках крепления шунтов (см. рис. 8), как и при типовом зигзаге  $\pm 300$  мм [7].

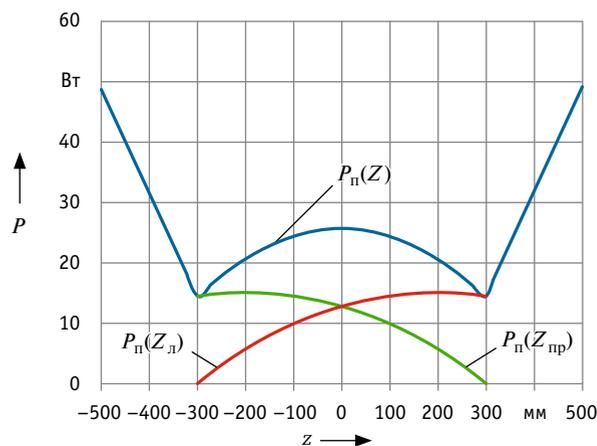


Рис. 5. Резистивная мощность нагрева полоза без учета его шунтов

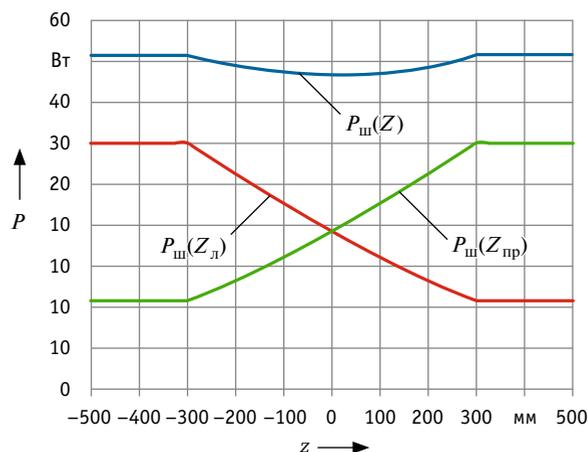


Рис. 6. Резистивная мощность нагрева шунтов

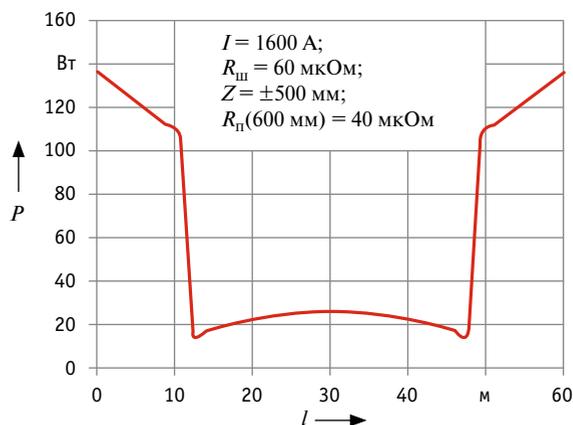


Рис. 7. График суммарной резистивной мощности нагрева полоза в пролете

Приведенная усовершенствованная модель распределения электрических потерь и тока по полозу токоприемника при движении подвижного состава не требует значительных ресурсов, позволяет учитывать различные конфигурации зигзагов контактного провода и места установки шунтов на полозе.



Таблица 1

Матрица распределения резистивной мощности нагрева  $P(z; l)$  вдоль полоза в пролете контактной сети

$l, m$ $z, mm$	-510	-480	-450	-420	-390	-360	-330	-300	-270	-240	-210	-180	-150	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	480	510	$P(l)$		
0	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	136,5	
2	0	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	131,7
4	0	0	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	126,8
5	0	0	0	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	121,9
7	0	0	0	0	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	117,0
9	0	0	0	0	0	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	112,1
11	0	0	0	0	0	0	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	107,3	
12	0	0	0	0	0	0	0	1,30	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	15,01		
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17,02		
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,82	
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20,41	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21,79	
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22,95	
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23,91	
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,65	
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,18	
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,49	
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,60	
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,49	
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25,18
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,65
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23,91
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22,95
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21,79
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20,41
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,82
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17,02
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15,01
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	107,3
51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	112,1
53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	117,0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	121,9
56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	126,8
58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	131,7
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	136,5
$P(z)$	4,88	9,75	14,63	19,50	24,38	29,26	34,13	38,99	42,84	46,69	50,54	54,39	58,24	62,09	65,94	69,79	73,64	77,49	81,34	85,19	89,04	92,89	96,74	100,59	104,44	108,29	112,14	115,99	119,84	123,69	127,54	131,39	135,24	139,09	142,94	146,79	150,64	154,49

Предлагаемая модель распределения плотности тягового тока вдоль полоза токоприемника подвижного состава в режиме движения дает возможность оценить влияние увеличенного зигзага контактного провода и мест установки шунтов полоза на электрические потери в нем.

Точки подключения шунтов полоза существенно влияют на распределение тягового тока вдоль его конструкции и обуславливают величину электрических потерь. В качестве наименьшего рационального расстояния от оси токоприемника до шунтов целесообразно принимать значение зигзага контактной подвески, на которой эксплуатируется токоприемник. Увеличенное расстояние между шунтами полоза будет положительно сказываться на снижении потерь от увеличенного зигзага контактного провода, однако в средней части полоза потери от протекания токов к шунтам будут возрастать.

Выполненные расчеты электрических потерь в полозе с учетом увеличенного зигзага контактного провода не противоречат ни результатам работ ученых из ВНИИЖТ [5] и УрГУПС [6], ни исходной модели, разработанной в ОмГУПС [7].

Функции распределения тягового тока по плечам полоза и его шунтам, а также изменения сопротивлений при различ-

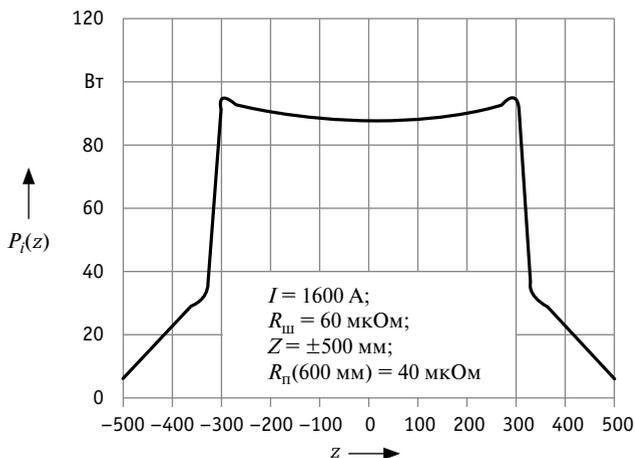


Рис. 8. Распределение потерь резистивной мощности полоза от протекания тягового тока

ном зигзаге контактного провода существенно дополняют математическую модель теплового состояния полоза токоприемника, представленную в работах [9, 11, 12].

## Литература

1. Утепбергенова С. М., Томилов В. В. Усовершенствованная математическая модель теплового состояния полоза токоприемника магистрального электроподвижного состава постоянного тока // Известия Транссиба. 2020. № 1 (41). С. 58–72. ISSN 2220-4245.
2. ГОСТ 32679–2014. Контактная сеть железной дороги. Технические требования и методы контроля. Москва : Стандартинформ, 2015. 16 с.
3. Увеличение грузозачной способности токоприемников / И. А. Беляев, Е. А. Вологин, Ю. Е. Купцов [и др.] // Железнодорожный транспорт. 1974. № 8. С. 51–54. ISSN 0044-4448.
4. Сидоров О. А., Смердин А. Н., Томилов В. В. Исследование температуры нагрева полоза токоприемника и способы ее снижения // Известия Транссиба. 2017. № 4 (32). С. 25–34. ISSN 2220-4245.
5. Тартынский Д. В., Емельянова М. Н., Тибилов А. Т. Исследование износа контактных токосъемных элементов на основе моделирования токораспределения в полозе токоприемника // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 2. С. 53–56. ISSN 2223-9731.
6. Паранин А. В., Ефимов Д. А. Расчет распределения тока в контактном проводе и полозе токоприемника при токосъеме // Транспорт Урала. 2009. № 4 (23). С. 81–84. ISSN 1815-9400.
7. Томилов В. В., Сидоров О. А., Утепбергенова С. М. Исследование распределения плотности тягового тока вдоль полоза токоприемника подвижного состава в режиме движения // Известия Транссиба. 2022. № 2 (50). С. 124–135. ISSN 2220-4245.
8. Исследования токовой грузозачной способности токоприемника магистрального электроподвижного состава / В. М. Павлов, О. А. Сидоров, А. Н. Смердин [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 4. С. 19–24. ISSN 2223-9731.
9. Смердин А. Н., Томилов В. В., Павлов В. М. Совершенствование методики определения грузозачных показателей токопри-

## References

1. Utepbergenova S. M., Tomilov V. V. Improved mathematical model thermal state of the pantograph head of the magistral electric rolling stock of direct current [Usovershenstvovannaya matematicheskaya model' teplovogo sostoyaniya poloza tokopriemnika magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava postoyannogo toka] // Journal of Transsib Railway Studies. 2020. No. 1 (41). Pp. 58–72. ISSN 2220-4245.
2. GOST 32679–2014. Contact line for railway. Technical requirements and control methods [Kontakt'naya set' zheleznoy dorogi. Tekhnicheskie trebovaniya i metody kontrolya]. Moscow : Standardinform, 2015. 16 p.
3. Increasing the load capacity of current collectors [Uvelichenie nagruzochnoy sposobnosti tokopriemnikov] / I. A. Belyaev, E. A. Vologin, Yu. E. Kuptsov [et al.] // Railway Transport. 1974. No. 8. Pp. 51–54. ISSN 0044-4448.
4. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Tomilov V. V. Research of pantograph panhead heating temperature and its reduction methods [Issledovanie temperatury nagreva poloza tokopriemnika i sposoby ee snizheniya] // Journal of Transsib Railway Studies. 2017. No. 4 (32). Pp. 25–34. ISSN 2220-4245.
5. Tartynskiy D. V., Emelyanova M. N., Tibilov A. T. Research of wear of contact current-collecting elements on the basis of modeling of current distribution in the current collector's slide [Issledovanie iznosa kontaktnykh tokos'emnykh elementov na osnove modelirovaniya tokoraspredeleeniya v poloze tokopriemnika] // Russian Railway Science Journal. 2015. No. 2. Pp. 53–56. ISSN 2223-9731.
6. Parinin A. V., Efimov D. A. Calculation of current distribution in contact wire and current collector runner at current pickup [Raschet raspredeleniya toka v kontaktnom provode i poloze tokopriemnika pri tokos'eme] // Transport of the Urals. 2009. No. 4 (23). Pp. 81–84. ISSN 1815-9400.
7. Tomilov V. V., Sidorov O. A., Utepbergenova S. M. Study of the traction current distribution along the panhead of the rolling stock pantograph in the motion mode [Issledovanie raspredeleniya plotnosti tyagovogo toka vdol' poloza tokopriemnika podvizhnogo sostava v rezhime dvizheniya] // Journal of Transsib Railway Studies. 2022. No. 2 (50). Pp. 124–135. ISSN 2220-4245.
8. Current-loading capacity investigations of current collector operated with mainline electric motive power [Issledovaniya tokovoy nagruzochnoy sposobnosti tokopriemnika magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava] / V. M. Pavlov, O. A. Sidorov, A. N. Smerdin [et al.] // Russian Railway Science Journal. 2015. No. 4. Pp. 19–24. ISSN 2223-9731.
9. Smerdin A. N., Tomilov V. V., Pavlov V. M. Improvement of the method for determining load indicators of current collectors of main electric roll-

емников магистрального электроподвижного состава // Известия Транссиба. 2019. № 3 (39). С. 99–10. ISSN 2220-4245.

10. ГОСТ 32204–2013. Токосъемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2014. 24 с.
11. Утепбергенова С. М., Томилов В. В., Сидоров О. А. Методика расчета теплового состояния полоза токосъемника магистрального электроподвижного состава с учетом изменения положения контактного провода в плане // Известия Транссиба. 2019. № 4 (40). С. 43–53. ISSN 2220-4245.
12. Томилов В. В., Тарасенко А. В., Кутькин А. Н. Особенности теплового расчета токосъемников магистрального электроподвижного состава // Материалы шестого международного симпозиума «Eltrans'2011». Санкт-Петербург : ПГУПС, 2013. С. 526–536.

ing stock [Sovershenstvovanie metodiki opredeleniya nagruzochnykh pokazateley tokopriemnikov magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava] // Journal of Transsib Railway Studies. 2019. No. 3 (39). Pp. 99–10. ISSN 2220-4245.

10. GOST 32204–2013. Current collectors of railway electric rolling stock. General specifications [Tokopriemniki zheleznodorozhnogo elektropodvizhnogo sostava. Obshhie tekhnicheskie usloviya]. Moscow : Standardinform, 2014. 24 p.
11. Utepbergenova S. M., Tomilov V. V., Sidorov O. A. Method for the heat state calculating of pantograph head of a mainline electric rolling stock taking account the contact wire stagger [Metodika rascheta teplovogo sostoyaniya poloza tokopriemnika magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava s uchetom izmeneniya polozheniya kontaktnogo provoda v plane] // Journal of Transsib Railway Studies. 2019. No. 4 (40). Pp. 43–53. ISSN 2220-4245.
12. Tomilov V. V., Tarasenko A. V., Kut'kin A. N. Features of thermal calculation of current collectors of main electric rolling stock [Osobennosti teplovogo rascheta tokopriemnikov magistral'nogo elektropodvizhnogo sostava] // Materials of the 6th International symposium «Eltrans'2011». St. Petersburg : PSTU, 2013. Pp. 526–536.

Объем статьи 0,76 авторских листа

УДК 621.332

**Евгений Викторович Добрынин**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия,

**Ксения Викторовна Богданова**, аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия,

**Евгений Михайлович Плохов**, доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ТЯГОВОЙ СЕТИ НА РАБОТУ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНЫХ СОСТАВОВ

**Evgeniy Viktorovich Dobrynin**, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Supply of Railway Transport Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia,

**Kseniya Viktorovna Bogdanova**, postgraduate student, Electric Supply of Railway Transport Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia,

**Evgeniy Mikhaylovich Plokhov**, DSc in Engineering, Professor, Locomotives Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia

## Evaluation of the heterogeneity impact of a traction network on operation of control system parameters of movement of electric rolling stocks

### Аннотация

Рассмотрена система мониторинга параметров работы СТЭ, состоящая из датчиков тока и напряжения, устанавливаемых в межподстанционной зоне. Оценено влияние неоднородности контактной подвески и утечки токов из рельса в землю на точность определения таких показателей, как потребляемый ток, напряжение на токоприемнике, координата электроподвижного состава. Выявлены особенности работы системы мониторинга в условиях неоднородности тяговой сети, предложено решение, позволяющее снизить воздействие этого фактора.

**Ключевые слова:** системы тягового электроснабжения, контактная сеть, электроподвижной состав, датчик напряжения, датчик тока, ток утечки, напряжение, рельсовая цепь.

### Abstract

A system for monitoring the parameters of a traction power supply system, consisting of current and voltage sensors installed in the inter-substation area, is considered. The impact of the inhomogeneity of a contact suspension and leakage of currents from the rail to the ground on the accuracy of determining parameters such as current consumption, voltage on a current collector and the coordinate of electric rolling stock is evaluated. The peculiar features of the monitoring system operation in the conditions of heterogeneity of the traction network are revealed, a solution is proposed to reduce the impact of this factor.

**Keywords:** traction power supply systems, contact network, electric rolling stock, voltage sensor, current sensor, leakage current, voltage, rail circuit.

DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-108-112

Система тягового электроснабжения (СТЭ) имеет два уровня — внешний, включающий устройства выработки, распределения электроэнергии и ее передачи до тяговой подстанции, и основной — тяговые подстанции и тяговые сети. Тяговая сеть, в свою очередь, представляет собой совокупность проводов и устройств: контактной сети, рельсового пути питающих и отсасывающих линий, а также других компонентов, необходимых для работы системы. От работоспособности каждого устройства зависит общая работоспособность системы тягового электроснабжения и возможность решения функциональных задач.

Основная задача системы тягового электроснабжения — гарантированное обеспечение электроэнергией перевозочного процесса, в том числе передача достаточной мощности для движения электроподвижных составов (ЭПС) и соблюдение уровня напряжения на их токоприемниках [1].

Современная организация перевозочного процесса нацелена на увеличение массы поездов, например, за последние 20 лет максимальная масса выросла с 6300 до 8000 т, т.е. на 27 %. При этом система тягового электроснабжения, которая была спроектирована для поездов с массой до 5000 т, за это время практически не модернизировалась. Увеличение максимальных масс поездов выше проектных оказалось по большей степени возможным за счет использования резерва. То есть на тех тяговых подстанциях, на которых силовое оборудование (преобразователи и трансформаторы) устанавливалось, как правило, по два комплекта (один в работе, второй в резерве), в настоящее время работают в параллель все. Таким образом, за счет

снижения надежности выполняется задача энергообеспечения движения поездов повышенной массы.

Использование резервного оборудования позволяет обеспечить электроподвижные составы достаточной мощностью, но оставляет ограничение по уровню напряжения в контактной сети. Для поддержания минимального уровня напряжения на токоприемнике ЭПС (2700 В) на тяговых подстанциях завышают уровень напряжения холостого хода до максимально допустимого значения (3800 В) [2]. Увеличение напряжения холостого хода на тяговых подстанциях приводит к росту потерь в трансформаторах и снижению возможности использования рекуперативной энергии. Кроме того, напряжение повышают не на всех подстанциях, а только там, где наблюдаются его критические падения. В свою очередь, разное напряжение на смежных тяговых подстанциях становится причиной возникновения уравнильных токов, увеличивающих нагрузку на тяговые подстанции с более высоким уровнем напряжения и приводящих к росту потерь [3].

Чтобы обеспечить требуемый уровень напряжения и сохранить потенциал рекуперации, разработан ряд технических решений с использованием автоматизированных систем регулирования напряжения. Основа любой системы автоматического регулирования — целевая функция, при помощи которой формируется управляющее решение [4]. Для систем регулировки напряжения это соответствие между током нагрузки и напряжением на выходе с подстанции. Однако такой подход не учитывает поездную ситуацию на межподстанционной зоне, в том числе прогноз нагрузки, что не позволяет принимать эффективные управляющие решения.

Для управления напряжением предложена система контроля, построенная на датчиках тока и напряжения, устанавливаемых в межподстанционной зоне [5–8]. Чтобы с помощью этой системы отслеживать уровень напряжения на токоприемниках ЭПС, датчики размещают таким образом, чтобы между любыми двумя поездами было как минимум два датчика напряжения [9]. Алгоритм работы системы идентификации положения ЭПС, уровня напряжения на нем и потребляемого

тока построен на условии однородности тяговой сети на всем участке.

В реальных условиях сопротивление тяговой сети в межподстанционной зоне не является однородным по следующим причинам:

для усиления контактной подвески используются усиливающие провода, которые могут быть установлены не на всей межподстанционной зоне, а только на какой-то ее части (например, от одной из тяговых подстанций до поста секционирования);

на межподстанционной зоне может размещаться станция с второстепенными путями, что локально увеличивает сечение подвески;

обратная тяговая сеть представляет собой рельсы, имеющие электрическую связь с землей и неоднородным переходным сопротивлением, изменяющимся на протяжении межподстанционной зоны в зависимости от состояния грунта, на которое, в свою очередь, оказывают влияние погодные условия.

Однородность тяговой сети позволяет определить искомые параметры ЭПС с погрешностью, равной погрешности датчиков напряжения и тока. Оценим погрешности определения напряжения, тока нагрузки и дислокации ЭПС, которые возникают в условиях неоднородности тяговой сети, вызванных указанными факторами.

При однородности параметров тяговой сети на протяженном участке уровень напряжения в контактной сети изменяется линейно (рис. 1). Поэтому для вычисления координаты ЭПС и напряжения на нем используются уравнения прямой

по каждому отрезку исходя из координат начала и конца ( $x$  — пикет нахождения поезда,  $U$  — напряжение на его токоприемнике,  $U_i, x_i$  — напряжение на датчиках и координаты их установки):

$$(U_1 - U_2) \cdot x + (x_1 - x_2) \cdot U + (x_1 \cdot U_2 - x_2 \cdot U_1) = 0; \quad (1)$$

$$A \cdot x + B \cdot U + C = 0. \quad (2)$$

Условие точки перегиба — если прямые не совпадают, т.е. выполняется соотношение коэффициентов в уравнении

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2}. \quad (3)$$

Если две смежные прямые не совпадают, то на их пересечении находится ЭПС, потребляющий ток. Поскольку используется падение напряжения на участке, то оно зависит от двух параметров — тока и сопротивления. То есть при разном сопротивлении на одном участке эффект будет такой же, как при протекании разных токов.

В случае использования однотипной подвески в границах тяговых подстанций и поста секционирования диаграмма распределения напряжений на этом интервале сохраняет линейность и при решении задачи не дает погрешности больше, чем имеет измерительная система.

Рассмотрим случай, когда в подвеске на части участка используются разные провода либо имеется станция с второстепенными путями, которые снижают удельное сопротивление на этом участке, что дает аналогичный эффект.

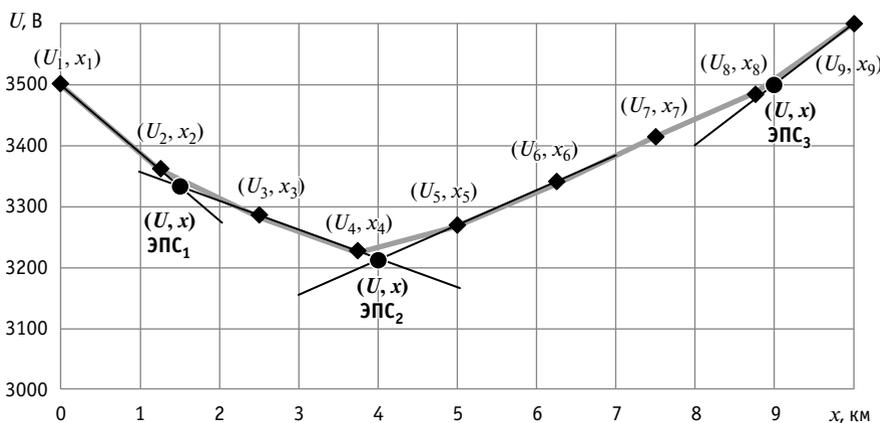


Рис. 1. Диаграмма напряжения в контактной сети межподстанционной зоны с тремя ЭПС

Если в пределах межподстанционной зоны есть участок с меньшим удельным сопротивлением (например, станция), использование алгоритма определения параметров ЭПС по уровню напряжения покажет два ложных электроподвижных состава, расположение которых придется на границы такого участка (станции) (рис. 2). Отличительной особенностью станет то, что эти ЭПС не будут перемещаться.

При знании границ участков с другим удельным сопротивлением их можно фильтровать, но при приближении к ним ЭПС, когда между границей станции и ЭПС будет меньше двух датчиков напряжения, система уравнений не даст решения. Поэтому для такого участка вводится коэффициент, равный отношению удельных сопротивлений двух смежных участков. Причем на границах участков с разными сопротивлениями датчики напряжения устанавливаются так, чтобы между поездами их было не менее двух. Следовательно, задача решается без дополнительной погрешности, вызванной неоднородностью контактной сети в межподстанционной зоне.

Перейдем к рассмотрению следующего фактора — неоднородность обратной тяговой сети, включающей рельсовые цепи и землю. Рельсовая цепь имеет связь с землей, из-за чего часть обратного тока, выбирая путь наименьшего сопротивления, частично протекает через землю и подземные сооружения [10]. На рис. 3 представлены диаграммы изменения потенциала рельсов между ЭПС и тяговой подстанцией. За нулевой потенциал принята точка подключения обратной линии подстанции к рельсам. Изменение потенциала построено для тока 1000 А и рельсов Р65. При низкой электропроводности грунта и высоком переходном сопротивлении между рельсом и землей ток практически полностью протекает по рельсам, и потенциал меняется линейно (рис. 3а). С ростом электропроводности земли характер изменения потенциала рельса становится нелинейным (рис. 3б). При высокой электропроводности ток практически сразу уходит в землю возле ЭПС и возвращается в рельсы только в районе тяговой подстанции, поэтому в середине этой зоны потенциал рельсов остается почти на одном уровне (рис. 3в).

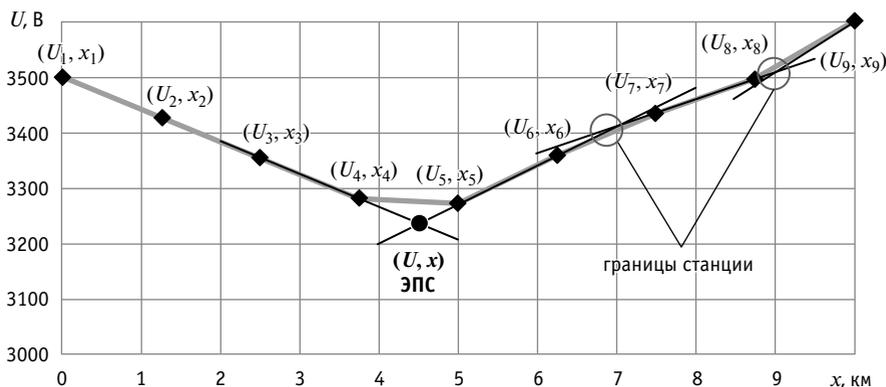


Рис. 2. Диаграмма напряжения в контактной сети межподстанционной зоны с одним ЭПС и участком (станцией) с пониженным сопротивлением контактной сети

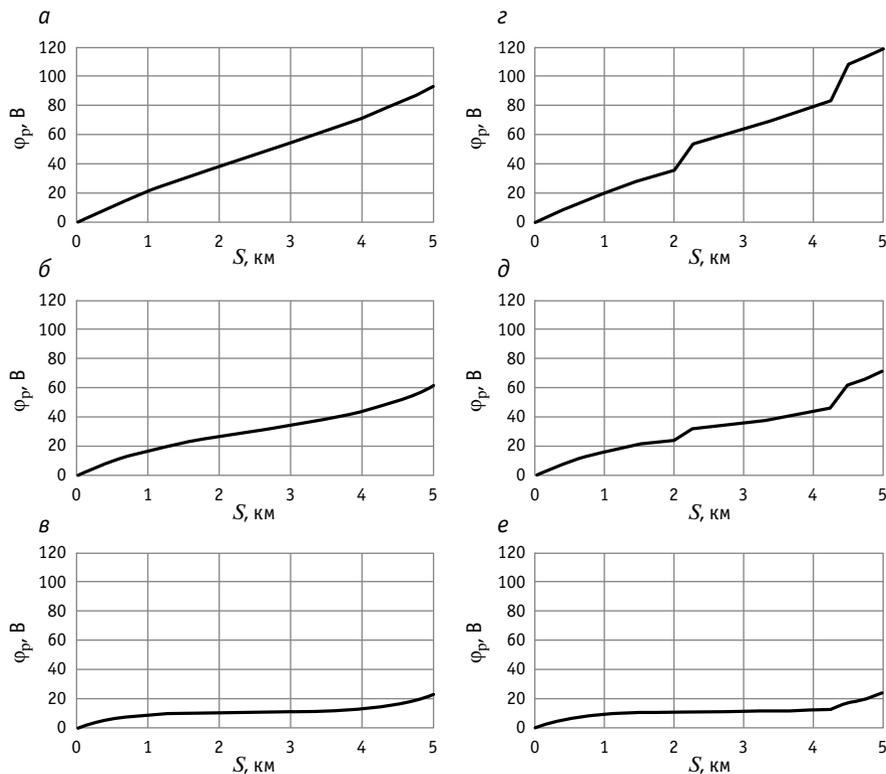


Рис. 3. Диаграммы изменения потенциала рельсов между подстанцией и ЭПС без учета (а, б, в) и с учетом (г, д, е) сопротивления изолирующих стыков

Рельсовая цепь кроме проводящих стыков включает в себя также изолирующие, которые размещаются на границе блок-участков. Для обеспечения фильтрации сигналов автоблокировки и пропуска тягового тока на изолирующих стыках устанавливаются дроссель-трансформаторы. Их сопротивление для тягового тока должно быть минимальным, но оно в несколько раз больше сопротивления проводящего стыка, что приводит к по-

вышению сопротивления рельсовой цепи и увеличению утечки тока в землю. Изменение потенциала с учетом изолирующих стыков и проводимости земли представлено на рис. 3г, д, е.

Сопротивление рельсовых цепей по сравнению с сопротивлением контактной подвески значительно ниже. Например, при подвеске М120+2МФ100+А185, наиболее часто используемой на дорогах постоянного тока, и рельсах Р65 их удель-

ные сопротивления отличаются в 3,3 раза, а с учетом проводимости грунта разница может достигать до 10 раз [10].

Среднеквадратичное отклонение от прямолинейной зависимости с ростом проводимости перехода «рельс — земля» и земли по отношению к рельсам сначала быстро растет, а потом снижается (рис. 4), если не учитывать изолирующие стыки. С учетом изолирующих стыков среднеквадратичное отклонение падения напряжения от прямой сокращается с ростом проводимости земли и снижением переходного сопротивления. Представленные отклонения рассчитаны для условий, по которым были получены диаграммы рис. 3.

Поскольку при падении напряжения 120 В отклонение составляет 6 В, получается, что оно будет равно 5 %, а если принять во внимание, что сопротивление обратной цепи составляет примерно  $\frac{1}{4}$  общего сопротивления тяговой сети, то отклонение напряжения составит 1,25 %. Так как датчики напряжения расставлены не на бесконечно малых интервалах, а по два датчика на блок-участок, следует учитывать отклонение напряжения только на них. В этом случае на отдельных датчиках отклонение от линейности может достигать до 16 % (4 %), причем это наблюдается на датчике, который размещается после первого изолирующего стыка в сторону тяговой подстанции относительно ЭПС. Следовательно, в расчетах его показания учитываться не могут. На остальных датчиках отклонение будет в пределах 9 % (2,25 %).

С ростом проводимости земли и снижением переходного сопротивления влияние обратной цепи снижается. Во-первых, это происходит из-за снижения полного сопротивления обратной цепи между ЭПС и тяговой подстанцией. Во-вторых, это сопротивление практически не зависит от расстояния между ЭПС и тяговой подстанцией и сводится к постоянному значению (см. рис. 3в, е и рис. 5). Зависимость от расстояния появляется только при приближении ЭПС к тяговой подстанции (на рис. 5 справа от ЭПС график имеет горизонтальный участок, а слева от ЭПС приближается к наклонной прямой).

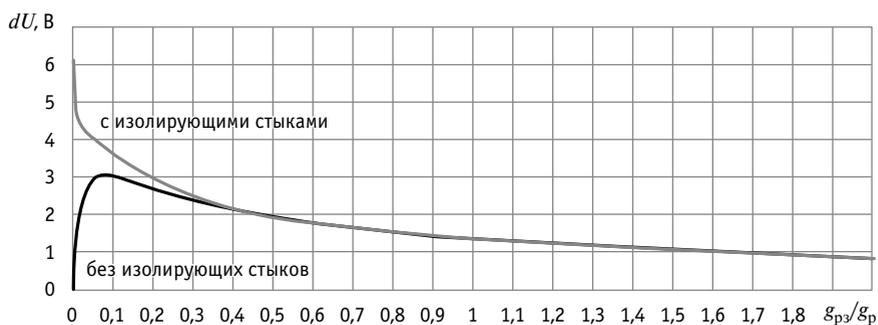


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичного отклонения падения напряжения в обратной цепи от отношения проводимости «рельс — земля» ( $g_{pz}$ ) и рельсов ( $g_p$ )

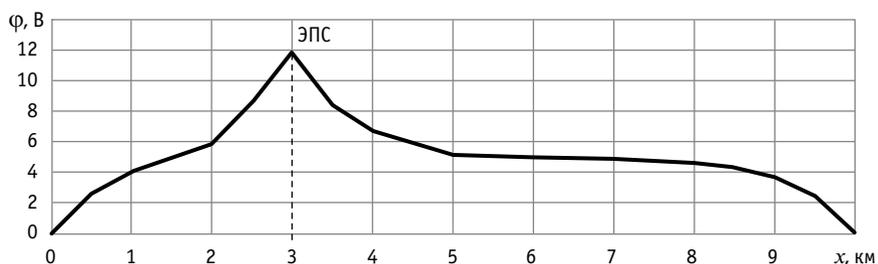


Рис. 5. Диаграмма изменения потенциала рельсов в момент нахождения ЭПС в межподстанционной зоне

Если из-за большого отклонения, вызванного утечкой тока из рельсов в землю, учитывать в расчетах параметров ЭПС показания датчика напряжения рядом с ЭПС не следует, то момент прохождения поезда рядом с ним может быть зафиксирован с достаточно высокой точностью. На графике напряжения он будет иметь вид пика аналогично представленному на рис. 5. Соответственно такая идентификация возможна с достаточной задержкой по времени, чтобы распознать всплеск, точнее, для измеряемого напряжения между рельсом и контактной подвеской это будет провал напряжения.

Таким образом, датчики напряжения и тока могут использоваться для определения места дислокации ЭПС, но с учетом следующих особенностей:

в однородной тяговой сети возможно определение с погрешностью, зависящей только от датчиков тока и напряжения;

для решения задачи в межподстанционной зоне с разными удельными сопротивлениями необходимо размещать датчики на границе изменения удельного сопротивления тяговой сети и в расчетную

модель вводить коэффициент, равный отношению удельных сопротивлений двух смежных участков, что исключает влияние неоднородности контактной подвески на адекватность результатов работы системы;

утечка обратного тока из рельсов в землю приводит к появлению высокой погрешности при приближении ЭПС к изолирующим стыкам и к точке подключения обратной линии подстанции к рельсам. Это создает зону неопределенности, которую следует интерполировать по реперным точкам, получаемым при прохождении ЭПС мест установки датчиков напряжения.

В целом система мониторинга параметров работы СТЭ и движения ЭПС может быть рекомендована для решения задач автоматизированного управления процессом электроснабжения в условиях повышенной нагрузки (тяжеловесного движения). При этом необходимо учитывать рассмотренные факторы и алгоритмы расчета локальных зон, в которых погрешность может превышать уровень, необходимый для корректной работы системы.

## Литература

1. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. Москва : Альянс, 2018. 528 с.
2. Аржанников Б. А., Набойченко И. О. Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ : монография. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2015. 258 с.
3. Добрынин Е. В., Бошкарёва Т. В., Табаков О. В. Система контроля напряжения в контактной сети // Электротехника. 2020. № 3. С. 46–49. ISSN 0013-5860.
4. Аржанников Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока : монография. Екатеринбург : УрГУПС, 2010. 176 с.
5. Богданова К. В. Управляемость устройств системы тягового электроснабжения : сборник докладов Национальной конференции с международным участием, Белгород, 18–20 мая 2022 г. Белгород : БГТУ, 2022. С. 51–55.
6. Добрынин Е. В., Титоренко К. В. Система контроля уровня напряжения в контактной сети // Электроэнергетические комплексы и системы: история, опыт, перспектива : сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Хабаровск, 19–20 ноября 2020 г. Хабаровск : ДВГУПС, 2020. С. 28–31.
7. Титоренко К. В. Эффективное управление уровнем напряжения в контактной сети // Энергетика и автоматизация в современном обществе : материалы IV Международной научно-практической конференции обучающихся и преподавателей, Санкт-Петербург, 4 июня 2021 г. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2021. С. 18–21.
8. Система контроля уровня напряжения в контактной сети / Е. В. Добрынин, К. В. Богданова : патент 2775174 Российская Федерация. № 2021100342 ; заявл. 11.01.2021 ; опубл. 28.06.2022, Бюл. № 19.
9. Оперативный контроль уровня напряжения в контактной сети / К. В. Титоренко, Е. В. Добрынин, Т. В. Бошкарёва, О. В. Табаков // Наука и образование транспорту : материалы XII Международной научно-практической конференции, Самара, 6–7 ноября 2019 г. Самара : СамГУПС, 2019. С. 411–414.
10. Тер-Оганов Э. В., Пышкин А. А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. 432 с.

Объем статьи 0,62 авторских листа

## References

1. Markvardt K. G. Power supply of electrified railways [Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog]. Moscow : Transport, 1982. 528 p.
2. Arzhannikov B. A., Naboichenko I. O. A concept for reinforcement of 3.0 kV DC traction power supply system [Kontseptsiya usileniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka 3,0 kV] : monograph. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2015. 258 p.
3. Dobrynin E. V., Boshkareva T. V., Tabakov O. V. Voltage monitoring system in a contact network [Sistema kontrolya napryazheniya v kontaktnoy seti] // Russian Electrical Engineering. 2020. No. 3. Pp. 46–49. ISSN 0013-5860.
4. Arzhannikov B. A. Controllable electric power supply system for electrified DC railways [Sistema upravlyаемого elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog postoyannogo toka] : monograph. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2010. 176 p.
5. Bogdanova K. V. Controllability of traction electric power supply system devices [Upravlyаемost' ustroystv sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya] : collection of reports of the National conference with international participation, Belgorod, May 18–20, 2022. Belgorod : BSTU, 2022. Pp. 51–55.
6. Dobrynin E. V., Titorenko K. V. Voltage level monitoring system in contact network [Sistema kontrolya urovnya napryazheniya v kontaktnoy seti] // Electric power complexes and systems: history, experience, prospects : collection of scientific papers of the All-Russian scientific and technical conference with international participation, Khabarovsk, November 19–20, 2020. Khabarovsk : FESTU, 2020. Pp. 28–31.
7. Titorenko K. V. Effective control of the voltage level in the contact network [Effektivnoe upravlenie urovnem napryazheniya v kontaktnoy seti] // Energetics and automation in modern society : materials of the 4th International scientific and practical conference of students and lecturers, St. Petersburg, June 4, 2021. St. Petersburg : St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 2021. Pp. 18–21.
8. Voltage level monitoring system in a contact network [Sistema kontrolya urovnya napryazheniya v kontaktnoy seti] / E. V. Dobrynin, K. V. Bogdanova : patent 2775174 Russian Federation. No. 2021100342 ; filed 11.01.2021 ; publ. 28.06.2022, Bulletin No.19.
9. Operational control of the voltage level in a contact network [Operativnyy kontrol' urovnya napryazheniya v kontaktnoy seti] / K. V. Titorenko, E. V. Dobrynin, T. V. Boshkareva, O. V. Tabakov // Science and education for transport : materials of the 12th International scientific and practical conference, Samara, November 6–7, 2019. Samara : SSTU, 2019. Pp. 411–414.
10. Ter-Oganov E. V., Pyshkin A. A. Power supply of railways [Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog]. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2014. 432 p.

**Подписка на 2023 год.**

Периодичность — 4 номера в год.

ф. СП-1

8

**АБОНЕМЕНТ**

на ~~газету~~  
журнал

**46463**

(индекс издания)

**Транспорт Урала**

(наименование издания)

Количество комплектов:

на 2023 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
						X	X	X	X	X	X

**Куда**

(почтовый индекс)

(адрес)

**Кому**

(фамилия, инициалы)

**ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА**

на ~~газету~~  
журнал

**46463**

(индекс издания)

**Транспорт Урала**

(наименование издания)

Стои-  
мость

подписки  
переадресовки

руб. \_\_\_ коп.  
руб. \_\_\_ коп.

Количество комплектов:

на 2023 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
						X	X	X	X	X	X

**Куда**

(почтовый индекс)

(адрес)

**Кому**

(фамилия, инициалы)

### Уважаемые читатели и авторы журнала «Транспорт Урала»!

Если вам нравится наш журнал, вы можете оказать содействие в его развитии, перечислив денежные средства по реквизитам:

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС

ИНН-КПП 6670317893/667001001

ОГРН 1156600001470

620075, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Шевченко, д. 20, помещение 1

Р/с 40703810863010000192

в ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ

к/с 30101810900000000795

БИК 046577795

**Назначение платежа:** «Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС».

Ваша финансовая поддержка позволит нам увеличить число публикаций, повысить индексы цитирования журнала и наших авторов.

### Уважаемые руководители инновационных компаний и предприятий!

Предлагаем вам услуги по продвижению вашей продукции через сеть Ассоциации выпускников УЭМИИТ-УрГУПС.

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС — это кооперация большого числа неравнодушных людей различных сфер деятельности, окончивших наш университет.

Кроме того, предлагаем услуги по подбору молодых специалистов, по организации поиска решений прикладных и научных задач в рамках диссертационных работ, выполняемых в УрГУПС.

Всю необходимую информацию вы можете получить по тел. (343) 221-24-67 или на сайте <http://www.usurt.ru/vypusknikam/assotsiatsiya-vypusnikov-urgups>

<b>Извещение</b>	<p><b>Получатель:</b> Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС <b>КПП:</b> 667001001 <b>ИНН:</b> 6670317893 <b>ОКТМО:</b> 65701000 <b>Р/сч.:</b> 40703810863010000192 <b>в:</b> ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ <b>БИК:</b> 046577795 <b>К/сч.:</b> 30101810900000000795 <b>Код бюджетной классификации (КБК):</b> _____ <b>Платеж:</b> Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС <b>Плательщик:</b> _____ <b>Адрес плательщика:</b> _____ <b>ИНН плательщика:</b> _____ <b>№ л/сч. плательщика:</b> _____ <b>Сумма:</b> _____ руб. ____ коп.  Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2023 г.</p>
<b>Квитанция</b>	<p><b>Получатель:</b> Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС <b>КПП:</b> 667001001 <b>ИНН:</b> 6670317893 <b>ОКТМО:</b> 65701000 <b>Р/сч.:</b> 40703810863010000192 <b>в:</b> ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ <b>БИК:</b> 046577795 <b>К/сч.:</b> 30101810900000000795 <b>Код бюджетной классификации (КБК):</b> _____ <b>Платеж:</b> Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС <b>Плательщик:</b> _____ <b>Адрес плательщика:</b> _____ <b>ИНН плательщика:</b> _____ <b>№ л/сч. плательщика:</b> _____ <b>Сумма:</b> _____ руб. ____ коп.  Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2023 г.</p>

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

DOI:10.20291/1815-9400

№ 2 (77), 2023 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 4 раза в год

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Пресса России» — 46463

Издание зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18098

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.

Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя и издателя:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Тел. (343) 221-24-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: [EPupova@usurt.ru](mailto:EPupova@usurt.ru)

Главный редактор:

Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:

Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор и корректор:

Елена Семеновна Пупова,

тел. (343) 221-24-90, 8-912-61-07-229,

e-mail: [EPupova@usurt.ru](mailto:EPupova@usurt.ru)

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Илья Ефимович Рабинович

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписано в печать 30.06.2023

Выход в свет 17.07.2023

Тираж 250 экз. (1-й з-д 1–40)

Формат 60×90/8

Цена 563,42 руб.

Изготовлено в ИБК УрГУПС,

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Заказ № 27

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2023